



**Miguel da Luz Louraço Rocha de  
Azevedo Proença**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

## **Verificação da segurança à fadiga em estruturas metálicas sujeitas a cargas rolantes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil de Estruturas

Orientador: José António Cruz Delgado, Mestre, Civiconcebe

Co-orientador: João Carlos Rocha de Almeida, Professor  
Associado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Mário Vicente da Silva, Prof. Auxiliar, FCT-UNL  
Arguente: Filipe Pimentel Amarante dos Santos, Prof. Auxiliar, FCT-UNL  
Vogal: João Carlos Rocha de Almeida, Prof. Associado, FCT-UNL



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Setembro 2018**



“Copyright” Miguel da Luz Loureiro Rocha deAzevedo Proença, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a colaboração de um conjunto de pessoas que me acompanharam.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Engenheiro José Delgado, o meu orientador, pelo apoio, disponibilidade e conhecimento prestado para me esclarecer e orientar sempre que necessário.

Ao Professor João Rocha de Almeida, o meu co-orientador, pela sua ajuda incansável, conhecimento e paciência nas dúvidas que foram surgindo ao longo deste trabalho. Aos meus orientadores um grande obrigado pela sua dedicação, exigência e rigor científico que foi fundamental para a realização deste trabalho assim como para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Professor Rui Martins, do departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, pela disponibilidade apresentada em esclarecer conceitos dos seus domínios científicos.

Ao Professor Francisco Fernandes, do departamento de Engenharia de Materiais, pela disponibilidade apresentada em esclarecer conceitos dos seus domínios científicos.

À minha família, por todo o seu apoio incondicional, exigência e valores transmitidos.

À Carolina, que esteve ao meu lado e me apoiou nos momentos mais difíceis, com muita paciência e carinho. Foi uma pessoa fundamental desde o momento em que me acompanhou este percurso.

Aos meus amigos de infância, pelos momentos partilhados e me acompanham desde sempre, com um especial agradecimento ao Rafael Antunes com quem sempre pude contar, desabafar e que me viu crescer todos os níveis, um grande obrigado.

Aos meus amigos da faculdade, com quem partilhei o meu percurso académico e tornou esta etapa da vida mais especial, com especial agradecimento ao Luís Luz por todos os obstáculos que vivemos e ultrapassámos em conjunto sempre com vista ao sucesso.

Ao Doutor Carlos Rodrigues pelos seus conselhos de vida e total disponibilidade.



# Resumo

Os edifícios industriais envolvem, frequentemente, equipamentos mecânicos que solicitam a estrutura principal do edifício a cargas amplificadas, devidas aos efeitos dinâmicos desses equipamentos. Assim, o dimensionamento de estruturas metálicas pode requerer uma análise aprofundada das consequências que o fenómeno da fadiga, eventualmente, provocará em elementos metálicos e nas respetivas ligações no caminho de rolamento de pontes rolantes que são particularmente sensíveis a este tipo de fenómeno.

O trabalho desenvolvido incide sobre a verificação da segurança à fadiga de ligações metálicas aparafusadas parafusos e soldadas viga-pilar, onde a geometria dos entalhes tem consequência direta no tempo de vida dos elementos.

O dimensionamento à fadiga é efetuado com base na lei de Miner, que fornece o número de ciclos ( $N$ ) até à rotura por fadiga em função da amplitude de tensão ( $\Delta\sigma$ ) a que um dado elemento metálico, considerado isoladamente, está sujeito. Neste contexto, a escolha do tipo de aço torna-se fundamental, na medida em que existe o risco do aço perder ductilidade e passar a apresentar um comportamento frágil perante variações de tensões cíclicas, o que sucede caso o aço atinja o seu limite de fadiga correspondente ao número de ciclos de tensão atuantes.

São expostas as principais disposições e recomendações existentes nas normas europeias EN1993-1-1 e EN1993-1-9, relativas ao estudo da fadiga. Com base nos resultados obtidos, procura-se extrair conclusões quanto à metodologia de análise deste tipo de estruturas, tendo em vista a otimização do seu dimensionamento relativamente à verificação de segurança à fadiga.

## Palavras chave:

Pontes rolantes; Fadiga; Verificação de segurança; Efeitos dinâmicos; Amplitude de tensão; Qualidade do aço.





# Abstract

Industrial buildings are frequently equipped with mechanical machinery which subjects the main structure of the building with multiple loads due to the dynamic effect of those equipments. Thus, the design of steel structures may request a profound analysis for the fatigue's phenomenon consequences, eventually induced on the welded joints of the crane runway beam.

This work focuses on the security assessment of bolted and welded beam-column steel joints, where the geometry has direct influence on the fatigue life of the elements.

The fatigue design is based in Miner's law, which provides the number of cycles ( $N$ ) to fatigue failure, under a given stress range ( $\Delta\sigma$ ) that an isolated steel element is subjected. In this context, steel selection becomes relevant, in view of the risk of steel losing its ductility and gaining brittle behavior under cyclic stress range. This situation may happen if the steel reaches its fatigue limit related to the number of cycles of imposed stresses. In this work, the main prescriptions and recommendations given in EN 1993-1-1 and EN 1993-1-9, regarding fatigue behaviour are presented and discussed. Based on the results obtained, it is sought to draw conclusions about the methodology to follow in the analysis of this type of structures, having in mind the design optimization and the fatigue safety requirements.

## Keywords:

Bridge cranes; Fatigue; Safety assessment; Dynamic effects; Stress range; Steel subgrade.



# Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas	xix
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xxi
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento geral e motivação . . . . .	1
1.2 Descrição . . . . .	2
1.3 Organização da dissertação . . . . .	2
<b>2 Fenómeno de fadiga</b>	<b>5</b>
2.1 Enquadramento histórico . . . . .	5
2.2 Aspetos gerais da fadiga . . . . .	6
2.3 Histórico de tensões . . . . .	6
2.4 Métodos de análise à fadiga . . . . .	7
2.4.1 Método de acumulação de danos . . . . .	8
2.4.2 Método de tensão equivalente . . . . .	14
2.5 Curvas S-N . . . . .	15
2.5.1 Categoria de pormenores . . . . .	17
2.6 Teoria da mecânica da fratura . . . . .	20
<b>3 Suscetibilidade dos aços à fadiga - Aspetos metalúrgicos na produção do aço</b>	<b>23</b>
3.1 Considerações gerais . . . . .	23
3.2 Propriedades do aço estrutural . . . . .	23
3.3 Rotura frágil . . . . .	24
3.4 Relação entre fadiga e microestrutura do aço . . . . .	26
3.4.1 Aços com menor suscetibilidade à fadiga . . . . .	27
3.5 Técnicas de melhoramento de soldadura . . . . .	28

3.5.1	Tipos de ligações soldadas . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Caracterização de guas móveis</b>	<b>37</b>
4.1	Enquadramento geral . . . . .	37
4.2	Tipos de guas . . . . .	37
4.2.1	Pontes rolantes . . . . .	37
4.2.2	Pórticos rolantes . . . . .	41
4.3	Estrutura de suporte de pontes rolantes . . . . .	42
4.3.1	Carris . . . . .	43
4.3.2	Sistema de fixação . . . . .	44
4.3.3	Palmilhas . . . . .	44
4.3.4	Fins de curso . . . . .	44
4.3.5	Vigas de caminho de rolamento . . . . .	45
4.3.6	Pilares . . . . .	47
4.3.7	Contraventamento de pilares . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Verificação de segurança à fadiga - Enquadramento regulamentar</b>	<b>49</b>
5.1	Considerações gerais . . . . .	49
5.2	Combinações de ações . . . . .	49
5.2.1	Coeficiente $\psi$ para ações de serviço de pontes rolantes . . . .	50
5.3	Classificação das ações . . . . .	51
5.3.1	Ações dinâmicas . . . . .	51
5.4	Ações de uma ponte rolante . . . . .	52
5.4.1	Fatores dinâmicos . . . . .	53
5.4.2	Ações de serviço . . . . .	55
5.4.3	Ações de fadiga . . . . .	58
5.4.4	Ações de múltiplas pontes rolantes . . . . .	59
5.5	Classificação dos equipamentos . . . . .	60
5.6	Verificação de segurança à fadiga . . . . .	60
5.7	Classe de consequência . . . . .	61
5.7.1	Métodos de verificação . . . . .	61
5.8	Verificação da resistência à fadiga . . . . .	63
5.8.1	Verificação pelo método de acumulação de danos . . . . .	63
5.8.2	Verificação pelo método do fator de dano equivalente . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Caso de estudo</b>	<b>65</b>
6.1	Caracterização do modelo de cálculo . . . . .	67
6.2	Caracterização de ações . . . . .	69
6.3	Secções transversais . . . . .	71
6.4	Classe de funcionamento das pontes rolantes . . . . .	71
6.5	Modelos de cálculo . . . . .	72
6.5.1	Pormenores 1 e 2 . . . . .	75
6.5.2	Pormenores 3 e 4 . . . . .	75
6.5.3	Pormenor 5 . . . . .	76
6.5.4	Pormenor 6 . . . . .	76
6.5.5	Pormenor 7 . . . . .	77
6.6	Resultados . . . . .	77

6.6.1	Verificação de segurança . . . . .	77
6.6.2	Recomendação de subclasse do aço . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>83</b>
7.1	Considerações finais . . . . .	83
7.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	84
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>85</b>
	<b>Apêndice</b>	<b>89</b>



# Índice de figuras

2.1	Espectro de tensões de amplitude constante, adaptado de [14]. . . .	7
2.2	Espectro de tensões de amplitude variável, adaptado de [14]. . . .	7
2.3	Sequência de carregamento tipo, adaptado de [27]. . . . .	8
2.4	Histórico de tensões de um pormenor construtivo, adaptado de [27].	9
2.5	Representação de amplitudes de tensão, adaptado de [27]. . . . .	9
2.6	Espectro de tensões, adaptado de [27]. . . . .	9
2.7	Curva tipo de resistência à fadiga, adaptado de [27]. . . . .	10
2.8	Cálculo do dano acumulado pela regra de <i>Palmgren-Miner</i> , adaptado de [19]. . . . .	11
2.9	Histórico de tensões em função do tempo, adaptado de [16]. . . . .	12
2.10	Histórico de tensões rodado 90°, adaptado de [16]. . . . .	12
2.11	Organização de amplitudes de tensão obtidas pelo método "rainflow", adaptado de [16]. . . . .	13
2.12	Método do Reservatório, adaptado de [14]. . . . .	13
2.13	Curva S-N para tensões normais [27]. . . . .	16
2.14	Curva S-N para tensões de corte [27]. . . . .	16
2.15	Pormenor tipo de ligação no nó de uma viga de caminho de rolamento.	18
2.16	Pormenores 1 e 2, adaptado de [27] . . . . .	19
2.17	Pormenor 3, adaptado de [27] . . . . .	19
2.18	Pormenores 4 e 7, adaptado de [27] . . . . .	19
2.19	Pormenor 5, adaptado de [27] . . . . .	20
2.20	Pormenor 6, adaptado de [27] . . . . .	20
2.21	Modos de abertura de uma fenda, adaptado de [9]. . . . .	21
2.22	Taxa de propagação de uma fenda, adaptado de [29] . . . . .	21
2.23	Exemplo de propagação de uma fenda, adaptado de [17]. . . . .	22
2.24	Relação entre $N$ e o comprimento da fissura, adaptado de [18]. . . .	22
3.1	Diagrama $\sigma$ - $\varepsilon$ de aços laminados, adaptado de [34]. . . . .	24
3.2	Relação entre energia de impacto e temperatura, adaptado de [26]. .	25
3.3	Tensões na microestrutura do aço . . . . .	27
3.4	Rotura no pé da soldadura, adaptado de [21] . . . . .	29
3.5	Rotura na raiz da soldadura, adaptado de [21] . . . . .	29
3.6	Técnica de moagem do pé da soldadura, adaptado de [15] . . . . .	30
3.7	Faseamento de moagem de soldaduras íngremes, adaptado de [21] . .	30
3.8	Benefícios do <i>Burr Grinding</i> nas curvas S-N, adaptado de [21] . . . .	31
3.9	Posicionamento da tocha de <i>TIG Dressing</i> , adaptado de [21] . . . . .	32

3.10	Resultado da tocha de <i>TIG Dressing</i> , adaptado de [21] . . . . .	32
3.11	Benefícios do <i>TIG Dressing</i> nas curvas S-N, adaptado de [21] . . . . .	32
3.12	Procedimento do <i>Hammer Peening</i> , adaptado de [21] . . . . .	33
3.13	Benefícios do <i>Hammer Peening</i> nas curvas S-N, adaptado de [21] . . . . .	34
3.14	Benefícios do <i>Needle Peening</i> nas curvas S-N, adaptado de [21] . . . . .	35
4.1	Elementos principais de uma ponte rolante, adaptado de [19]. . . . .	39
4.2	Ponte rolante monoviga, adaptado de [1]. . . . .	39
4.3	Sistema <i>monorail</i> , adaptado de [1]. . . . .	40
4.4	Ponte rolante biviga, adaptado de [1]. . . . .	40
4.5	Ponte rolante suspensa, adaptado de [1]. . . . .	41
4.6	Ponte rolante em consola, adaptado de [1]. . . . .	41
4.7	Pórtico rolante. . . . .	42
4.8	Exemplo de estrutura porticada com equipamentos de movimentação de cargas, adaptado de [11]. . . . .	43
4.9	Tipos de carril, adaptado de [37]. . . . .	43
4.10	Pormenor da junta de carril de uma ponte rolante, adaptado de [36]. . . . .	44
4.11	Exmplos de amortecedores de final de curso, adaptado de [37]. . . . .	45
4.12	a) Rotação devida a forças verticais na extremidade da viga (vista em alçado), b) Rotação devida a forças horizontais na extremidade da viga (vista em planta), adaptado de [36]. . . . .	46
4.13	Exemplos de secções transversais adotadas em vigas de caminho de rolamento, adaptado de [37]. . . . .	46
4.14	a) Pontes rolantes leves, b) Pontes rolantes médias, c) Pontes rolantes pesadas, adaptado de [20]. . . . .	47
4.15	Vista em alçado de um pórtico com pontes rolantes. . . . .	48
5.1	Ações verticais totais na ponte rolante, adaptado de [35] . . . . .	56
5.2	Forças horizontais $K$ , adaptado de [35] . . . . .	56
5.3	Forças horizontais transversais $H_{T,1}$ e $H_{T,2}$ , adaptado de [35] . . . . .	57
5.4	Forças $H_s$ devidas a falta de guiamento, adaptado de [35] . . . . .	58
5.5	Número máximo recomendável de pontes rolantes que podem atuar numa estrutura, adaptado de [35] . . . . .	59
5.6	Fiabilidade à fadiga em função do método de verificação e da classe de consequência, adaptado de [19] . . . . .	62
6.1	Planta do edifício. . . . .	65
6.2	Alçado do edifício, vista no plano XZ. . . . .	66
6.3	Alçado do edifício, vista no plano YZ. . . . .	66
6.4	Exemplo de ponte rolante, adaptado de [19]. . . . .	66
6.5	Vista tridimensional do modelo da estrutura do edifício. . . . .	67
6.6	Vista em planta do modelo. . . . .	67
6.7	Vista do modelo: Alçado XZ. . . . .	67
6.8	Vista do modelo: Alçado YZ. . . . .	67
6.9	Esquema de forças resultantes da ponte rolante, adaptado de [19]. . . . .	70
6.10	Secção transversal tipo, adaptado de [2]. . . . .	71
6.11	Parafuso pré-esforçado, adaptado de [32] . . . . .	73



6.12	Tensões atuantes em soldaduras, adaptado de [19]	74
6.13	Situações de rotura numa soldadura, adaptado de [19]	74
6.14	Modelo para cálculo de tensões nos pormenores 1 e 2	75
6.15	Modelo para cálculo de tensões nos pormenores 3 e 4	75
6.16	Modelo para cálculo de tensões no pormenor 5	76
6.17	Modelo para cálculo de tensões no pormenor 6	76
6.18	Modelo para cálculo de tensões no pormenor 7	77
6.19	Representação gráfica do método da gota de água associado ao pormenor 5 no apoio 2.	78
6.20	Representação gráfica do método do reservatório associado ao pormenor 5 no apoio 2.	78
1	Histórico de tensões - Pormenor 1.	91
2	Histórico de tensões - Pormenor 2.	91
3	Histórico de tensões - Pormenor 3.	91
4	Histórico de tensões - Pormenor 4.	91
5	Histórico de tensões - Pormenor 6.	92
6	Histórico de tensões - Pormenor 7.	92
7	Histórico de tensões - Pormenor 1.	92
8	Histórico de tensões - Pormenor 2.	92
9	Histórico de tensões - Pormenor 3.	92
10	Histórico de tensões - Pormenor 4.	92
11	Histórico de tensões - Pormenor 5.	93
12	Histórico de tensões - Pormenor 7.	93
13	Histórico de tensões - Pormenor 1.	93
14	Histórico de tensões - Pormenor 2.	93
15	Histórico de tensões - Pormenor 3.	93
16	Histórico de tensões - Pormenor 4.	93
17	Histórico de tensões - Pormenor 5.	94
18	Histórico de tensões - Pormenor 6.	94
19	Histórico de tensões - Pormenor 7.	94
20	Histórico de tensões - Pormenor 1.	94
21	Histórico de tensões - Pormenor 2.	94
22	Histórico de tensões - Pormenor 3.	95
23	Histórico de tensões - Pormenor 4.	95
24	Histórico de tensões - Pormenor 5.	95
25	Histórico de tensões - Pormenor 6.	95
26	Histórico de tensões - Pormenor 7.	95
27	Histórico de tensões - Pormenor 1.	96
28	Histórico de tensões - Pormenor 2.	96
29	Histórico de tensões - Pormenor 3.	96
30	Histórico de tensões - Pormenor 4.	96
31	Histórico de tensões - Pormenor 6.	96
32	Histórico de tensões - Pormenor 7.	96
33	Método da gota de água - Pormenor 1.	97
34	Método da gota de água - Pormenor 2.	97
35	Método da gota de água - Pormenor 3.	97

36	Método da gota de água - Pormenor 4. . . . .	97
37	Método da gota de água - Pormenor 7. . . . .	98
38	Método da gota de água - Pormenor 1. . . . .	98
39	Método da gota de água - Pormenor 2. . . . .	98
40	Método da gota de água - Pormenor 3. . . . .	98
41	Método da gota de água - Pormenor 4. . . . .	98
42	Método da gota de água - Pormenor 5. . . . .	99
43	Método da gota de água - Pormenor 7. . . . .	99
44	Método da gota de água - Pormenor 1. . . . .	99
45	Método da gota de água - Pormenor 2. . . . .	99
46	Método da gota de água - Pormenor 3. . . . .	99
47	Método da gota de água - Pormenor 4. . . . .	99
48	Método da gota de água - Pormenor 5. . . . .	100
49	Método da gota de água - Pormenor 7. . . . .	100
50	Método da gota de água - Pormenor 1. . . . .	100
51	Método da gota de água - Pormenor 2. . . . .	100
52	Método da gota de água - Pormenor 3. . . . .	100
53	Método da gota de água - Pormenor 4. . . . .	100
54	Método da gota de água - Pormenor 5. . . . .	101
55	Método da gota de água - Pormenor 7. . . . .	101
56	Método da gota de água - Pormenor 1. . . . .	101
57	Método da gota de água - Pormenor 2. . . . .	101
58	Método da gota de água - Pormenor 3. . . . .	101
59	Método da gota de água - Pormenor 4. . . . .	101
60	Método da gota de água - Pormenor 7. . . . .	102
61	Método do reservatório - Pormenor 1. . . . .	102
62	Método do reservatório - Pormenor 2. . . . .	102
63	Método do reservatório - Pormenor 3. . . . .	102
64	Método do reservatório - Pormenor 4. . . . .	102
65	Método do reservatório - Pormenor 7. . . . .	103
66	Método do reservatório - Pormenor 1. . . . .	103
67	Método do reservatório - Pormenor 2. . . . .	103
68	Método do reservatório - Pormenor 3. . . . .	103
69	Método do reservatório - Pormenor 4. . . . .	103
70	Método do reservatório - Pormenor 5. . . . .	104
71	Método do reservatório - Pormenor 7. . . . .	104
72	Método do reservatório - Pormenor 1. . . . .	104
73	Método do reservatório - Pormenor 2. . . . .	104
74	Método do reservatório - Pormenor 3. . . . .	104
75	Método do reservatório - Pormenor 4. . . . .	104
76	Método do reservatório - Pormenor 5. . . . .	105
77	Método do reservatório - Pormenor 7. . . . .	105
78	Método do reservatório - Pormenor 1. . . . .	105
79	Método do reservatório - Pormenor 2. . . . .	105
80	Método do reservatório - Pormenor 3. . . . .	105
81	Método do reservatório - Pormenor 4. . . . .	105
82	Método do reservatório - Pormenor 5. . . . .	106

83	Método do reservatório - Pormenor 7. . . . .	106
84	Método do reservatório - Pormenor 1. . . . .	106
85	Método do reservatório - Pormenor 2. . . . .	106
86	Método do reservatório - Pormenor 3. . . . .	106
87	Método do reservatório - Pormenor 4. . . . .	106
88	Método do reservatório - Pormenor 7. . . . .	107



# Índice de tabelas

2.1	Valores de $\lambda$ de acordo com a classificação de uma ponte rolante, adaptado de [35]. . . . .	15
3.1	Designação de subclasses do aço, adaptada de [7] . . . . .	25
3.2	Valor de dimensionamento de $f_y$ , adaptado de [7]. . . . .	26
3.3	Espessura máxima do aço para uma temperatura de referência de $-15^\circ C$ , adaptado de [7] . . . . .	26
5.1	Coefficientes $\psi_i$ para ações numa ponte rolante, adaptado de [35] . .	51
5.2	Tipos de ações . . . . .	51
5.3	Situações de projeto de uma ponte rolante e correspondentes fatores dinâmicos, adaptado de [35] . . . . .	53
5.4	Fatores dinâmicos $\varphi_i$ , adaptado de [35] . . . . .	53
5.5	Valores de cálculo $\varphi_{2,min}$ e $\beta_2$ , adaptado de [35] . . . . .	54
5.6	Valores de $\varphi_5$ , adaptado de [35] . . . . .	55
5.7	Valores de $\varphi_7$ , adaptado de [35] . . . . .	55
5.8	Classes de ações de fadiga de pontes rolantes, adaptado de [35] . . .	60
5.9	Tempo de vida útil de projetos, adaptado de [22] . . . . .	61
5.10	Classes de consequência, adaptado de [22] . . . . .	61
5.11	Valores do coeficiente parcial de resistência à fadiga, $\gamma_{Mf}$ , adaptado de [27] . . . . .	63
6.1	Casos de carga para uma ponte rolante. . . . .	68
6.2	Casos de carga para duas pontes rolantes. . . . .	69
6.3	Pesos das partes relevantes das ponte rolante e reações máximas por roda. . . . .	70
6.4	Forças resultantes do movimento da ponte rolante. . . . .	70
6.5	Velocidade dos equipamentos. . . . .	70
6.6	Coefficientes dinâmicos fornecidos pela <i>DEMAG</i> . . . . .	71
6.7	Propriedades do perfil HEB 600, adaptado de [2]. . . . .	71
6.8	Propriedades do perfil HEB 320, adaptado de [2]. . . . .	71
6.9	Ciclos de carga para uma ponte rolante. . . . .	72
6.10	Ciclos de carga para duas pontes rolantes. . . . .	72
6.11	Limites de fadiga a amplitude constante e limites de truncatura [27].	78
6.12	Resultados dos métodos de acumulação de danos para uma ponte rolante. . . . .	79

6.13 Resultados dos métodos de acumulação de danos para duas pontes rolantes. . . . .	79
6.14 Resultados pelo método de tensão equivalente para uma ponte rolante.	80
6.15 Resultados pelo método de dano equivalente para duas pontes rolantes.	81

# Lista de abreviaturas e símbolos

## Abreviaturas

F.E.M. Federation Europeenne de la Manutention

## Símbolos

$\alpha$  Coeficiente de dilatação térmica

$A_d$  Valor de cálculo de uma ação de acidente

$a$  Comprimento de uma fenda

$D_i$  Dano

$D_{tot}$  Dano total

$E$  Módulo de elasticidade

$F_{\varphi,k}$  Valor característico de uma ação dinâmica

$f_u$  Tensão última

$f_y$  Tensão de cedência

$G$  Módulo de distorção

$J$  Valor de tenacidade à fratura em regime elasto-plástico

$K$  Fator de intensidade de tensão

$m$  Inclinação da curva de resistência à fadiga

$N$  Valor de cálculo do tempo de vida expresso como um número de ciclos relativo a um intervalo de tensões constante

$n$  Número de ciclos

$Q_h$  Carga de elevação

$Q_{max,dup}$  Valor máximo característico de carga vertical dos rodados de todas as pontes rolantes a atuar em conjunto

$Q_{max,i}$  Valor máximo característico de carga vertical da roda  $i$

$Q_{fat}$	Valor da ação de fadiga
$S_i$	Classe de pontes rolantes
$T$	Temperatura
$T_{Ed}$	Temperatura de referência
$t$	Tempo
$Y$	Fator de correção geométrico
$\gamma$	Peso volúmico
$\gamma_{Ff}$	Coeficiente parcial para o intervalo de tensões de amplitude constante equivalente $\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$
$\gamma_{Mf}$	Coeficiente parcial para a resistência à fadiga
$\Delta h_{max}$	Diferença de altura entre carris
$\Delta K$	Variação de intensidade de tensão
$\Delta S$	Distância entre carris
$\Delta\sigma$	Amplitude de tensão
$\Delta\sigma_C$	Amplitude de tensão para uma categoria de pormenor
$\Delta\sigma_D$	Limite de fadiga a amplitude constante
$\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$	Intervalo de tensões de amplitude constante equivalente
$\Delta\sigma_{E,2}, \Delta\tau_{E,2}$	Intervalo de tensões de amplitude constante equivalente relativo a 2 milhões de ciclos
$\Delta\sigma_L, \Delta\tau_L$	Limite de truncatura
$\varepsilon$	Extensão
$\lambda$	Fator de dano equivalente
$\lambda_{1,i}$	Fator de dano equivalente correspondente ao espectro de carga normalizadas de fadiga
$\lambda_{2,i}$	Fator de dano equivalente para $N = 2 \times 10^6$
$\lambda_{dup}$	Coeficiente parcial da dano equivalente aos efeitos de múltiplas pontes rolantes a atuar em conjunto
$\lambda_{max}$	Valor máximo do fator de dano equivalente
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\sigma_{max}$	Tensão máxima



$\sigma_{min}$  Tensão mínima

$\varphi_{fat}$  Fator de impacto dinâmico de dano equivalente

$\Psi_0$  Coeficiente para determinação do valor de combinação de uma ação variável

$\Psi_1$  Coeficiente para determinação do valor frequente de combinação de uma ação variável

$\Psi_2$  Coeficiente para determinação do valor quase-permanente de combinação de uma ação variável



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento geral e motivação

No setor da construção de edifícios industriais, o fator económico é de extrema importância, tendo qualquer projeto de estruturas o objetivo de procurar uma solução com o menor custo possível, nunca colocando em causa o aspeto da segurança.

Estes edifícios são efetivamente projetados para conseguir espaços amplos com boa mobilidade de máquinas e pessoas, e possuem frequentemente equipamentos que permite aumentar a capacidade de movimentação de cargas, de modo a satisfazer as exigências de crescimento económico, rentabilização de espaços, redução de tempos de armazenamento e facilidade de manobra. Em edifícios industriais com equipamentos mecânicos é frequente a ocorrência de ações cíclicas que poderão colocar em causa a integridade estrutural dos elementos de aço devido a fenómenos de fadiga. É também importante a utilização de tipos de aço adequados para a finalidade pretendida, bem como a correta avaliação da amplitude das tensões instaladas.

O fenómeno de fadiga é complexo e mesmo nos dias que correm ainda não está totalmente compreendido. Os danos no material iniciam-se na sua estrutura cristalina, tornando-se visíveis macroscopicamente, numa fase posterior, através de uma deformação plástica e propagação de fendas. Este processo evolutivo depende de diversas considerações, tendo em conta a composição química do material e o seu comportamento mecânico.

As solicitações devidas ao içamento de cargas ou translação de pontes rolantes são exemplos de ações que podem provocar danos por fadiga na estrutura de suporte ou nos elementos de ligação entre componentes estruturais, tornando este fenómeno um aspeto ao qual se deve dar a devida relevância em termos de dimensionamento e verificação de segurança em estruturas metálicas industriais. Com efeito, a possibilidade de ocorrência de rotura pode levar à perda de vidas humanas e a danos materiais avultados.

## 1.2 Descrição

O presente trabalho incide sobre o projeto de uma nave industrial de grandes dimensões, fornecido pela empresa Civiconcebe, para elaboração de um caso de estudo, com o objetivo de analisar partes específicas do edifício em relação à verificação de segurança à fadiga em ligações soldadas e aparafusadas.

No exemplo referido, existe a possibilidade de, em determinados locais, alguns pilares estarem sujeitos a cargas transmitidas por duas pontes rolantes em simultâneo. Este aspeto condiciona ainda mais a verificação de segurança à fadiga. A complexidade da unidade industrial envolve também determinadas zonas em que asnas treliçadas terão de estar preparadas para receber os perfis metálicos laminados que suportam o *Monorail*, onde circula o sistema de elevação, designado por *Hoist*.

O caso de estudo abordado nesta dissertação incide sobre a análise dos efeitos decorrentes do funcionamento de uma e duas pontes rolantes sobre as consolas metálicas soldadas aos pilares metálicos que suportam as vigas de rolamento, através dos métodos de verificação à fadiga, nomeadamente o método de acumulação de dano e o método da tensão equivalente.

Atendendo a que, em estruturas sujeitas a cargas cíclicas, pode dar-se a ocorrência de rotura frágil antes de serem atingidos os limites de rotura do aço, a resistência à fadiga do aço constitui um fator de extrema importância neste tipo de estruturas.

## 1.3 Organização da dissertação

O conteúdo da dissertação está organizado em Introdução (capítulo 1); Caracterização do fenómeno de fadiga (capítulo 2); Suscetibilidade dos aços à fadiga (capítulo 3); Caracterização de pontes rolantes (capítulo 4); Verificação de segurança à fadiga (capítulo 5); Caso de estudo (capítulo 6); Apresentação de conclusões e recomendações para desenvolvimentos futuros (capítulo 7).

O capítulo 1 introduz a temática do presente trabalho, relativo a estruturas metálicas industriais sujeitas a cargas rolantes e realça a importância da verificação de segurança à fadiga dos elementos estruturais. É ainda resumida a descrição do trabalho e apresentadas as motivações do seu desenvolvimento.

O capítulo 2 faz o enquadramento histórico e teórico dos aspetos gerais do fenómeno da fadiga. São descritos os métodos desenvolvidos para análise e verificação da segurança à fadiga, sendo também abordada a teoria de previsão de propagação de fendas de acordo com a teoria da mecânica da fratura. Neste capítulo são também indicados os pormenores analisados no caso de estudo.

No capítulo 3 é feita uma breve descrição das propriedades do aço estrutural, e das suas características mecânicas, bem como das características microestruturais dos

aços com menor suscetibilidade à fadiga. Aborda-se também o fenómeno de rotura frágil de um material, relacionada com a sua tenacidade e as suas implicações na temática da fadiga.

No capítulo 4 são apresentados os tipos de mecanismos de movimentação de cargas e os elementos que os constituem. São também apresentadas soluções estruturais de suporte e pormenores de ligações correntemente utilizadas na sua construção, que melhor se adaptam às ações exercidas neste tipo de estruturas.

No capítulo 5 é feita uma exposição das ações a considerar no projeto de pontes rolantes e das correspondentes combinações de cálculo, de acordo com as normas europeias em vigor. Procede-se à exposição aprofundada dos métodos de verificação de segurança de elementos estruturais à fadiga, com base na regulamentação descrita no presente trabalho.

O capítulo 6 consiste na apresentação de resultados relativos ao caso prático analisado, referindo os modelos de cálculo adequados.

No capítulo 7 resume-se o trabalho desenvolvido, apresentando as principais conclusões extraídas dos resultados obtidos e indicando sugestões para desenvolvimentos futuros.



## Capítulo 2

# Fenómeno de fadiga

### 2.1 Enquadramento histórico

Em projeto de estruturas de engenharia civil é frequente existir a necessidade de analisar situações onde carregamentos cíclicos possam provocar danos e consequentemente rotura.

Este fenómeno pode ocorrer principalmente devido a rotura mecânica ou termomecânica, rotura por fadiga e corrosão.

*August Wöhler*(1852), deu arranque ao estudo sobre fadiga através de ensaios sistemáticos à escala real. Utilizou eixos de comboios, submetendo-os a torção, tração e corte, para compreensão do comportamento do material em termos de amplitude de tensões “versus” ciclos de aplicação. Esse estudo conduziu ao conceito de tensão limite de fadiga.

No final do século XIX, vários investigadores alargaram o estudo deste fenómeno, desenvolvendo as investigações iniciadas por *Wöhler*. Destacam-se *Bauschinger*(1886), que deu ênfase aos limites elásticos dos carregamentos reversíveis e *Bairstorw*(1910), que investigou as gamas tensão-deformação de resposta a um carregamento cíclico. Surgiu também o interesse no estabelecimento de métodos de cálculo de fadiga, tendo *Gerber*(1874) e *Goodman*(1899) dado um importante contributo nesse domínio, formulando um modelo para avaliação da tensão média.

Os métodos utilizados atualmente em projeto estrutural e verificação de segurança devem-se às propostas de diversos autores, que dependeram de contributos de estudos anteriores para desenvolver uma metodologia mais prática. *Basquin*(1910) apresentou uma equação matemática que representa as curvas S-N, a qual mais tarde foi reformulada por *Coffin* e *Manson*(1934), baseando-se em deformações. *Griffith*(1921) contribuiu através de conceitos energéticos para o estudo da mecânica da fratura com um modelo quantitativo de fratura de elementos frágeis. *Palmgren* e *Miner*(1924;1945) criaram um modelo de acumulação de dano, de modo a permitir quantificá-lo. *Neuber*(1946) deu ênfase aos entalhes estruturais, associando-lhes uma resistência característica, e às deformações monótonas e cíclicas. *Irwin*(1957), através do fator de intensidade de tensão,  $K$ , determinou o estado de tensão na vizinhança de uma fenda, posteriormente, *Paris*, *Gomez* e *Anderson*(1961) acrescentaram ao modelo de *Irwin* a variação da intensidade de tensão,  $\Delta K$ , na

propagação de fendas, o que resultou na lei de *Paris*. Realizaram-se ainda muitos outros estudos sobre esta matéria, que continua a ser investigada nos dias de hoje.

## 2.2 Aspetos gerais da fadiga

A fadiga é um fenómeno bastante comum em elementos de estruturas metálicas sujeitas a ações cíclicas e define-se como a perda de resistência ao longo do tempo. Este fenómeno manifesta-se sob a forma de fendas que se desenvolvem em zonas específicas das estruturas, tais como estruturas de suporte de pontes rolantes e em particular nas suas ligações. Pontes ferroviárias e plataformas petrolíferas, entre outras, são estruturas especialmente sensíveis a este tipo de fenómeno.

As fendas por fadiga ocorrem tendencialmente devido ao efeito combinado de concentrações de tensões e descontinuidades geométricas, mesmo que as tensões atuantes sejam substancialmente menores do que a tensão de cedência do aço. A propagação de fendas leva a uma rotura frágil do material. A suscetibilidade dessa propagação depende das características geométricas dos pormenores construtivos, do tipo de aço, da temperatura e dos ciclos de variação de tensão atuante no elemento.

O conhecimento e quantificação destes parâmetros é fundamental na fabricação, conceção e dimensionamento de elementos estruturais, por forma a evitar a ocorrência de fendas por fadiga, garantindo que as estruturas se mantêm dentro de limites admissíveis de segurança.

## 2.3 Histórico de tensões

Em geral considera-se que as ações induzidas por uma ponte rolante são de dois tipos – cargas estáticas e cargas dinâmicas. As cargas estáticas englobam o peso próprio da estrutura e são constantes ao longo do tempo, enquanto que as cargas dinâmicas (geradas pelo funcionamento da ponte rolante) produzem variações de esforços nos elementos estruturais conforme o posicionamento da carga.

Definidas as ações, são criados conjuntos de carga que simulam a passagem da ponte rolante nos elementos estudados. Fazendo variar a posição das cargas em intervalos constantes, registam-se os esforços nos diferentes pontos da estrutura e elaboram-se diagramas que representam as solicitações instaladas.

A definição de um diagrama de tensões contínuo possibilita o cálculo do dano associado a um dado pormenor construtivo, permitindo relacionar, simplificada, a ação aplicada e a sua resistência.

Para a elaboração de tais diagramas é necessária a aplicação de métodos de contagem de ciclos que permitam representar de forma adequada a passagem de uma ponte rolante como um conjunto de eventos discretos, determinando a frequência e grandeza da ocorrência.

Os espetros de tensão dependem do tipo de variação de tensão, isto é, variação de amplitude constante (Figura 2.1) ou de amplitude variável (Figura 2.2).



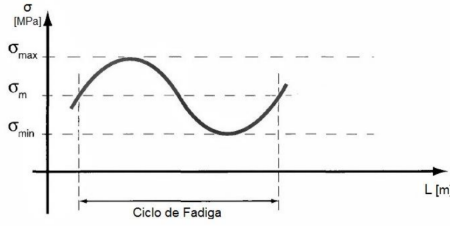


Figura 2.1: Espectro de tensões de amplitude constante, adaptado de [14].

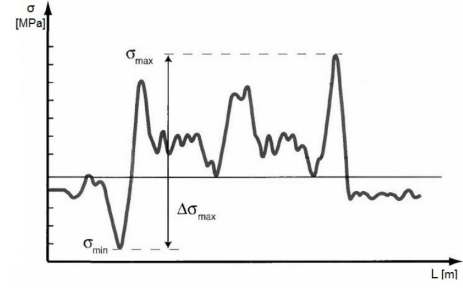


Figura 2.2: Espectro de tensões de amplitude variável, adaptado de [14].

Espectros de amplitude constante apresentam geralmente uma forma sinusoidal, sendo constituídos por uma única amplitude de tensão,  $\Delta\sigma$ , associada a um determinado número de ciclos,  $n$ .

A variação de tensão é obtida através da seguinte expressão:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.1)$$

Espectros de amplitude variável apresentam formas mais complexas, pelo que, é necessária a aplicação de métodos de contagem de ciclos para converter as solicitações em conjuntos de tensão de amplitude constante,  $\Delta\sigma_i$ , associados a um determinado número de ciclos,  $n_i$ .

O processo de contagem de ciclos é essencial no tratamento de dados de espectros de tensões de amplitude variável, pelo que são adotados alguns critérios, como:

- i contagem de máximos e mínimos relativos;
- ii contagem do número de classes entre extremos relativos;
- iii número de passagens através de um nível de tensão pré-determinado.

Os métodos de contagem de ciclos apresentados no presente trabalho são o Método da Gota de Água e o Método do Reservatório, cuja aplicação é frequentemente utilizada na previsão do comportamento de elementos à fadiga [27].

Os métodos referidos serão abordados posteriormente na Secção 2.4.

## 2.4 Métodos de análise à fadiga

As metodologias de análise à fadiga apresentadas visam o estabelecimento de regras para verificação de segurança e para dimensionamento de estruturas metálicas.

A verificação de segurança à fadiga de estruturas metálicas industriais, em particular de pontes rolantes, é realizada através dos seguintes modos:

- (i) Método de acumulação de danos
- (ii) Método de tensão equivalente

Os métodos referidos têm como objetivo prever e quantificar o dano causado por um determinado carregamento, isto é, o tempo que uma estrutura é solicitada sem que ocorra o início de fendas por fadiga nos seus elementos estruturais.

O método de acumulação de danos consiste numa análise mais detalhada, a partir do histórico de tensões, obtendo-se resultados mais precisos. Por outro lado, o método de tensão equivalente baseia-se na comparação entre as tensões atuantes e resistentes, através de uma análise teórica, mais simplista, baseada na passagem única de um conjunto de cargas. Existem diferenças entre estes métodos: embora o método de acumulação de danos seja mais preciso, é contudo mais trabalhoso do que o método de tensão equivalente, de aplicação mais simples e prática.

### 2.4.1 Método de acumulação de danos

O método de acumulação de danos implica uma rigorosa análise à fadiga. Neste método são obtidos espectros de tensão, resultantes das cargas atuantes na estrutura, que representam o modelo de cargas a adotar na análise. Os resultados obtidos a partir desta metodologia vêm em forma de dano, ou seja, a razão entre o número de vezes que as ações ocorrem e a resistência do elemento a essas mesmas ações. O objetivo deste método consiste na determinação de todas as ações aplicadas à estrutura e da consequente resistência dos seus elementos.

O processo de obtenção das ações atuantes associadas a cargas rolantes é feita a partir de uma análise elástica de estruturas, utilizando curvas de resistência à fadiga, ou curvas S-N (*Wöhler*, 1852), para obtenção de resistências de pormenores construtivos. A norma [27] apresenta a metodologia de verificação à fadiga a partir da acumulação de danos, de acordo com a sequência seguinte:

*Definição de modelos de cargas* para obtenção das tensões atuantes representativas do modelo, permitindo uma caracterização real e fidedigna dos esforços resultantes na estrutura;

*Passagem de cargas* correspondentes à simulação da passagem dos rodados sobre a viga de caminho de rolamento, com vista à identificação das secções mais desfavoráveis;

*Sequência de carregamento*, considerando todos os cenários de serviço previstos durante o tempo de vida de fadiga, com base no histórico de carregamento observado em estruturas semelhantes (ver Figura 2.3).

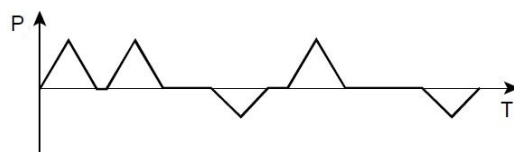


Figura 2.3: Sequência de carregamento tipo, adaptado de [27].

*Histórico de tensões*, é o diagrama das tensões atuantes a que um pormenor se encontra sujeito, em função do tempo (ver Figura 2.4).

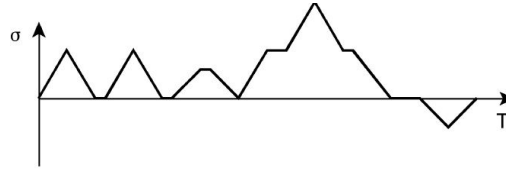


Figura 2.4: Histórico de tensões de um pormenor construtivo, adaptado de [27].

*Contagem de ciclos* para conversão das tensões obtidas no espectro contínuo de tensões num conjunto de intervalos de tensão e determinação do dano causado para cada um destes intervalos. Existem diversos métodos de contagem adequados, como o Método da Gota de Água (*Rainflow Method*) ou o Método do Reservatório (*Reservoir Method*), como indicado na Figura 2.5.

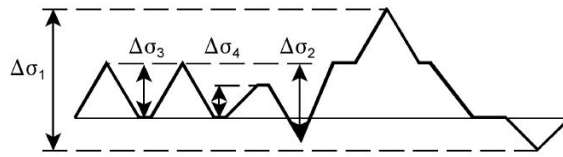


Figura 2.5: Representação de amplitudes de tensão, adaptado de [27].

*Espectro de tensões*, obtido a partir de um método de contagem de ciclos, classificado por ordem decrescente e convertido num conjunto de amplitudes de tensão ( $\Delta\sigma_i$ ) associadas ao número de vezes que cada conjunto se repete ( $n_i$ ), como indicado na Figura 2.6.

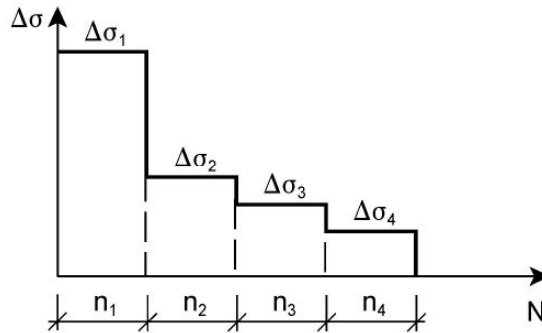


Figura 2.6: Espectro de tensões, adaptado de [27].

*Número de ciclos até à rotura*, determinado utilizando curvas S-N (abordadas com maior detalhe em 2.5) as quais fornecem  $N$  amplitudes de tensão,  $\Delta\sigma_i$ , que um determinado pormenor construtivo suporta para um determinado número de ciclos,  $N$  (ver Figura 2.7).

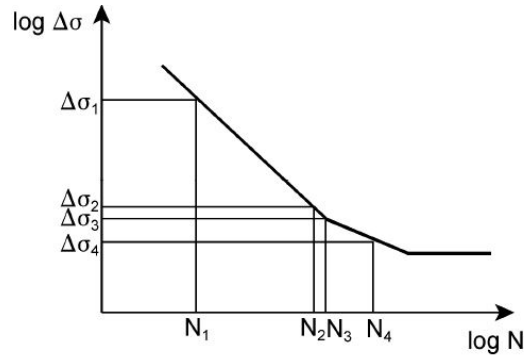


Figura 2.7: Curva tipo de resistência à fadiga, adaptado de [27].

*Dano acumulado*, o qual depende de cada amplitude de tensões,  $\Delta\sigma_i$ , associada ao respetivo número de vezes que se repete,  $n_i$ , e ao número máximo de ciclos a que o elemento em estudo resiste a essa amplitude de tensão,  $N$ .

Assim, o dano  $D_i$  correspondente a  $\Delta\sigma_i$  é:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.2)$$

Então, o dano acumulado é o somatório do dano causado por todos os acontecimentos discretos,  $i$ , associados a cada carregamento atuante na estrutura. O dano acumulado é determinado através da regra de *Palmegren-Miner*, sendo dado pela expressão:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \quad (2.3)$$

O somatório dos danos parciais, devidos a cada nível de amplitude de tensões representa o dano total,  $D_{tot}$ , de um elemento estrutural. A rotura ocorrerá se o dano acumulado for superior à unidade. Assim, há que verificar a seguinte expressão:

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{n_i}{N_i} \leq 1,0 \quad (2.4)$$

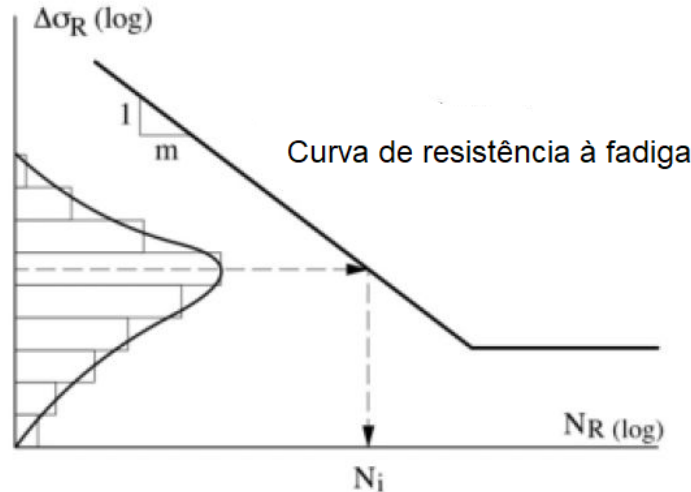


Figura 2.8: Cálculo do dano acumulado pela regra de *Palmgren-Miner*, adaptado de [19].

A utilização da expressão 2.4, em conjunto com a adoção de fatores parciais de segurança, é suficiente para o dimensionamento dos elementos estruturais à fadiga. Amplitudes de tensão que se situam abaixo do limite de fadiga, não são geralmente contabilizadas para esse efeito, embora, de forma conservativa, seja possível ignorar o limite da fadiga e considerar-se qualquer amplitude de tensão.

A aplicação prática do Método de Acumulação de Danos tem por base a definição rigorosa da intensidade e características do carregamento, visto que a sua aplicação é suportada por fórmulas matemáticas, sem qualquer tipo de aproximações ou conversões. Para tal, são necessários diversos parâmetros que podem ser obtidos em [35], referentes ao projeto em causa.

#### 2.4.1.1 Método da Gota de Água (*Rainflow Method*)

O Método da Gota de Água é um método de contagem de ciclos de tensão de amplitude variável, associado a estudos relacionados com fadiga. Geralmente, os diagramas são definidos em termos de tensões,  $\sigma$ , em função do tempo,  $t$ , como indicado na Figura 2.9.

A utilização deste método consiste na rotação de  $90^\circ$  do registo de tensões, imaginando-se que esse registo é um telhado sobre o qual desce uma gota de água.

O diagrama representado na Figura 2.10 apresenta os valores com números pares associados aos picos e os valores com números ímpares nos vales, ao longo dos quais se imagina uma gota de água em queda, englobando algumas considerações restritivas.

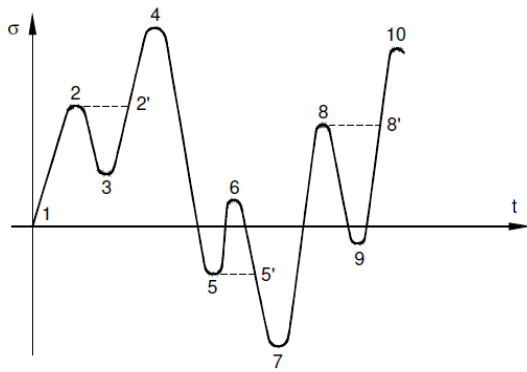


Figura 2.9: Histórico de tensões em função do tempo, adaptado de [16].

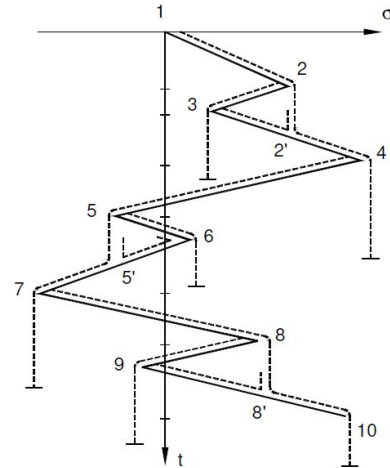


Figura 2.10: Histórico de tensões rodado 90°, adaptado de [16].

Na Figura 2.10, a gota de água pode seguir um caminho tanto da direita para a esquerda como da esquerda para a direita, iniciando o seu movimento sempre num pico ou num vale do diagrama. O trajeto da gota de água é interrompido quando:

- i) há interseção de trajetos de gotas, com início em locais diferentes (picos e vales), por exemplo, quando a gota que cai no ponto 5 interceta o trajeto da gota que vem do ponto 6;
- ii) ocorre a passagem por um ponto da mesma natureza (pico ou vale) e de tensão superior à tensão do ponto onde a gota iniciou o seu trajeto.

A contagem de ciclos dá-se quando:

- i) o percurso de uma gota é considerado como meio ciclo (exemplo – 1-2-2'-4);
- ii) o percurso de uma gota interrompido é considerado como um ciclo completo (exemplo – 5-6-5') ;
- iii) um novo percurso é iniciado apenas quando o anterior estiver terminado.

Os ciclos de tensões obtidos na Figura 2.10 são organizados num diagrama, apresentado na Figura 2.11, que agrupa os ciclos com a mesma amplitude de tensão, associados ao número de vezes que se repetem. A utilização de um diagrama deste tipo simplifica o tratamento de dados.

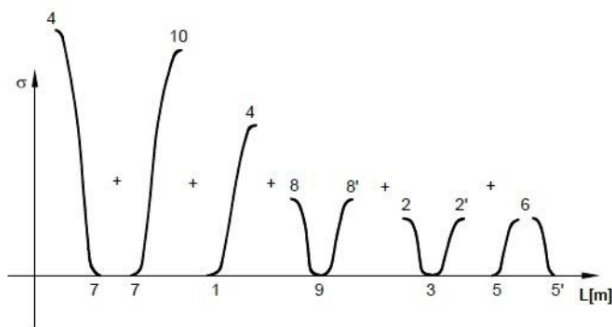


Figura 2.11: Organização de amplitudes de tensão obtidas pelo método "rainflow", adaptado de [16].

Em termos de aplicação prática, o método da gota de água fornece uma boa previsão do comportamento à fadiga, sendo o mais utilizado em projeto industrial [13], e sendo referenciado na norma EN 1993-1-9 como um dos métodos de contagem de ciclos de tensões que mais facilmente é implementado computacionalmente.

#### 2.4.1.2 Método do Reservatório (Reservoir Method)

Este método apresenta-se como um método alternativo de contagem de ciclos de um espectro de tensão. Contudo, não é o mais indicado para históricos de tensão muito extensos [14].

Dos dois métodos de contagem referidos – Método da Gota de Água e Método do Reservatório –, este último é o mais adequado ao cálculo manual pois é menos suscetível a erros, devido à menor extensão de registos de tensão.

A aplicação do Método do Reservatório consiste na duplicação do registo de tensões, considerando que esse diagrama (Figura 2.12) é um reservatório que se esvazia a partir dos pontos mínimos.

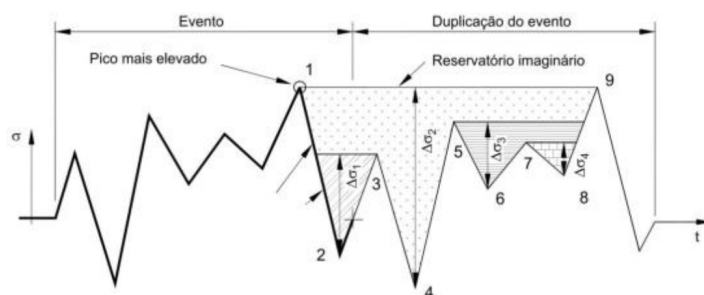


Figura 2.12: Método do Reservatório, adaptado de [14].

O Método do Reservatório pode ser descrito do seguinte modo, recorrendo à Figura 2.12:

- i) depois de feita a duplicação do registo original de tensões, une-se o ponto final do evento com o ponto inicial do evento duplicado;

- ii) os pontos máximos do evento inicial e do evento duplicado são unidos, considerando-se a área abaixo dessa linha como um reservatório;
- iii) a drenagem do reservatório tem início no ponto mais baixo do reservatório (ponto 4), sendo contabilizado então o primeiro ciclo de tensões, de amplitude igual à altura de água drenada –  $\Delta\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_4$ ;
- iv) por fim, o esvaziamento das restantes bolsas dá-se por ordem sequencial, do ponto mais baixo para o ponto mais alto, correspondendo respetivamente a  $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_3$  e  $\Delta\sigma_4$ .

Este método encontra-se descrito mais detalhadamente em [27].

### 2.4.2 Método de tensão equivalente

O método de tensão equivalente é um método de verificação de segurança à fadiga mais simplificado, relativamente ao método de acumulação de danos. A verificação à fadiga de estruturas com históricos de tensão, é um processo complexo e requer um conhecimento de todas as cargas a que a estrutura se encontrará submetida ao longo da sua vida útil. O que o conceito do fator de dano equivalente propõe é eliminar o trabalho exaustivo de análise de longos históricos de tensão.

Substituindo, por simplificação,  $\gamma_{Ff}Q_k$  por  $Q_{fat}$  é possível proceder à verificação à fadiga com modelos de carga aproximados, através de um fator de dano equivalente  $\lambda$ .

A verificação é feita para cada categoria de pormenor a analisar, através da expressão:

$$\Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_c \quad (2.5)$$

Em que:

$\Delta\sigma_{E,2}$  é a amplitude de tensão aplicada para 2 milhões de ciclos;

$\Delta\sigma_c$  é a resistência à fadiga da categoria do pormenor construtivo para 2 milhões de ciclos.

A simplificação dos modelos de cargas faz-se de forma a serem obtidos os valores de tensão máxima,  $\sigma_{máx}$ , e os valores de tensão mínima,  $\sigma_{mín}$ , considerando as cargas na sua posição mais desfavorável de acordo com a linha de influência do sistema estático da estrutura. As amplitudes de tensão  $\Delta\sigma(\gamma F f Q_k)$ , resultantes do respetivo modelo de cargas, não têm implícito o efeito da fadiga na estrutura. Por forma a obter um valor correspondente da amplitude de tensão equivalente de fadiga para 2 milhões de ciclos  $\Delta\sigma_{E,2}$ , o valor  $\Delta\sigma(\gamma F f Q_k)$  é corrigido pelo fator de dano equivalente  $\lambda$ , que pode ser obtido através da seguinte expressão [19]:

$$\lambda = \frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k)} \quad (2.6)$$

Caso seja possível determinar o modelo de carga (por forma a calibrar o modelo da estrutura em análise), consideram-se, para efeitos de cálculo, todas as solicitações



incertas que a estrutura possa vir a sofrer ao longo da sua vida útil. O conceito de tensão equivalente de dano tem por objetivo a determinação da resistência da estrutura à fadiga, comparando a ação resistente do pormenor construtivo com a ação atuante, de acordo com a expressão de verificação de segurança:

No caso de estruturas de suporte de pontes rolantes, o conceito de fator de dano equivalente tem como objetivo considerar os efeitos das cargas atuantes na estrutura [19], multiplicando-as pelo parâmetro  $\lambda$ . O parâmetro  $\lambda$  caracteriza os fatores de intensidade, volumes de carga e geometria dos veículos, considerando o modelo de cargas nas posições mais desfavoráveis.

Em [35] apresentam-se duas formas de obtenção do parâmetro  $\lambda$ . O processo mais rigoroso e complexo recorre a um espetro standardizado de cargas, admite uma distribuição gaussiana dos seus efeitos e assume uma acumulação do dano de acordo com a lei de *Palmgren-Miner*.

De forma alternativa e simplificada,  $\lambda$  pode ser obtido pela Tabela 2.1, de acordo com o tipo de ponte rolante, definido em função da respetiva de funcionamento, S.

Tabela 2.1: Valores de  $\lambda$  de acordo com a classificação de uma ponte rolante, adaptado de [35].

Classes	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$
Tensão normal	0.198	0.250	0.315	0.397	0.500	0.630	0.794	1.00	1.260	1.587
Tensão de corte	0.379	0.436	0.500	0.575	0.660	0.758	0.871	1.00	1.149	1.320

## 2.5 Curvas S-N

A quantificação da resistência de um detalhe estrutural à fadiga é levada a cabo através de ensaios com repetição de cargas cíclicas (amplitude constante), de modo a avaliar a tensão residual representativa do detalhe construtivo, apenas em fase elástica.

A avaliação da resistência à fadiga é geralmente efetuada por meio de curvas de *Wöhler*, mais correntemente designadas de curvas S-N (ver Figuras 2.13 e 2.14). Estas curvas permitem prever o comportamento de um elemento, estabelecendo uma relação entre o carregamento e o número de ciclos desse carregamento que leva à rotura.

As curvas S-N contabilizam os efeitos das imperfeições geométricas, resultantes da produção do aço e das possíveis concentrações de tensão devidas à geometria da soldadura, originando tensões residuais, e não fazem distinção quanto à classe de resistência do aço [14].

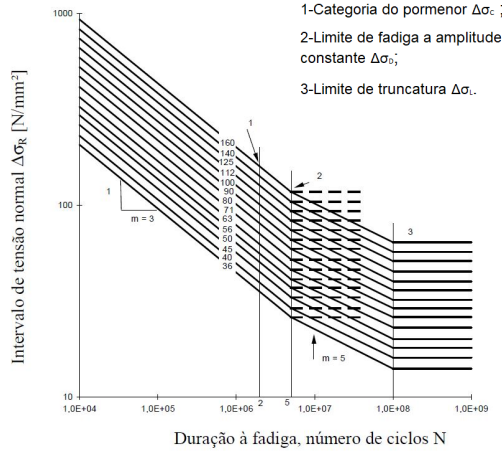


Figura 2.13: Curva S-N para tensões normais [27].

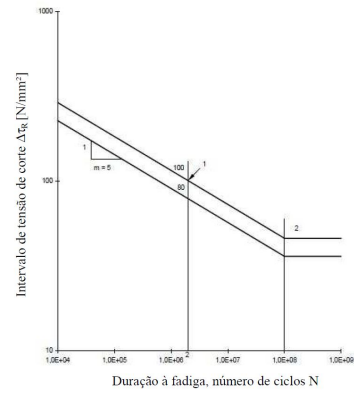


Figura 2.14: Curva S-N para tensões de corte [27].

As amplitudes de tensão nominal são avaliadas por curvas logarítmicas, quer para tensões normais,  $(\log \Delta \sigma_R) - (\log N)$  como para tensões tangenciais,  $(\log \Delta \tau_R) - (\log N)$ , correspondendo a categorias de pormenores estruturais definidos em [27]. A resistência à fadiga para amplitudes de tensão nominal (de amplitude constante) é apresentada em [27], podendo ser calculada da seguinte forma:

Para tensões normais:

- com  $N \leq 5 \times 10^6$

$$\Delta \sigma_R^m N_R = \Delta \sigma_C^m 2 \times 10^6, \quad \text{para } m = 3 \quad (2.7)$$

- com  $5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8$

$$\Delta \sigma_R^m N_R = \Delta \sigma_C^m 5 \times 10^6, \quad \text{para } m = 5 \quad (2.8)$$

- com  $N \geq 10^8$  (limite de truncatura)

$$\Delta \sigma_L = \left( \frac{5}{100} \right)^{1/5} \Delta \sigma_D \quad (2.9)$$

onde o limite de fadiga a amplitude constante,  $\Delta \sigma_D$ , é dado por:

$$\Delta \sigma_D = \left( \frac{2}{5} \right)^{1/3} \Delta \sigma_C \quad (2.10)$$

Para tensões de corte:

- com  $N \leq 10^8$

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m 2 \times 10^6, \quad \text{para } m = 5 \quad (2.11)$$

onde o limite de truncatura,  $\Delta\tau_L$ , é dado por:

$$\Delta\tau_L = \left( \frac{2}{100} \right)^{1/5} \Delta\tau_C \quad (2.12)$$

Analisando a Figura 2.13, é possível caracterizar três zonas distintas nas curvas S-N.

Para valores mais elevados de  $\Delta\sigma_R$  (curva de declive  $m = 3$ ), aproximadamente para ciclos compreendidos entre  $10^4$  e  $2 \times 10^6$ , a curva é designada de oligocíclica, ou seja, corresponde a baixos ciclos de fadiga, em que os elementos estruturais experienciam baixos números de ciclos para tensões de elevada magnitude e o material é mais suscetível a deformações plásticas [14].

O ponto 1, indicado na Figura 2.13, apresenta o valor  $\Delta\sigma_c$ , que corresponde à resistência do pormenor construtivo para uma amplitude de tensão repetida 2 milhões de ciclos.

O ponto 2 representa a resistência limite à fadiga  $\Delta\sigma_D$  para 5 milhões de ciclos, que corresponde à amplitude de tensão máxima recomendada por norma para controlar o dano por fadiga.

O ponto 3 corresponde à resistência limite de fadiga  $\Delta\sigma_L$  para 100 milhões de ciclos. Admite-se que tensões inferiores a este valor não causam dano no elemento, isto é, para baixos valores de  $\Delta\sigma_R$  o número de ciclos é superior, representando  $\Delta\sigma_L$ , um limite que pode ser aplicado sem que ocorra rotura por fadiga e os elementos estruturais suportem um número indefinido de ciclos de tensão [19].

As curvas S-N são utilizadas na determinação da resistência de um dado pormenor construtivo sujeito a uma amplitude de tensão constante.

### 2.5.1 Categoria de pormenores

Na sequência da abordagem às curvas S-N, importa referir que as mesmas estão associadas a categorias de pormenores que definem o número de ilimitado de ciclos que um dado pormenor resiste sob uma determinada tensão de amplitude constante. O estudo de fadiga em pontes rolantes é desenvolvido através da análise das condições a que os elementos estão sujeitos. Os pontos de análise são, normalmente, designados de pormenores, a cada um dos quais está, geralmente, associada uma categoria de pormenor que indica qual a tensão máxima a que o mesmo resiste após serem aplicados 2 milhões de ciclos de carga.

Os pormenores analisados no presente trabalho correspondem a ligações com parafusos e a ligações soldadas, sendo estas particularmente suscetíveis à iniciação e propagação de fendas por fadiga, originadas por concentrações de tensão que se dão nos pontos de união entre elementos. Em [27] são apresentadas tabelas com "pormenores tipo" de estruturas. As categorias de pormenor referentes aos casos abordados no presente trabalho são apresentados nas Figuras 2.16 a 2.20.

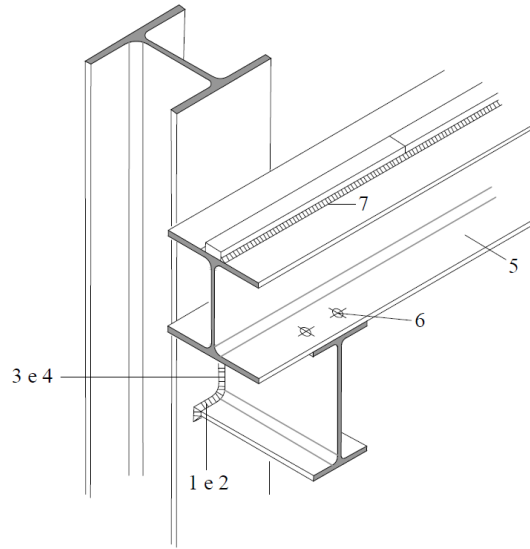


Figura 2.15: Pormenor tipo de ligação no nó de uma viga de caminho de rolamento.

A Figura 2.15 representa um exemplo comum de uma ligação entre elementos estruturais de uma ponte rolante, indicando os pontos com suscetibilidade ao aparecimento de fendas por fadiga, devido às solicitações de cargas transmitidas pelo funcionamento dos equipamentos, que de seguida são discriminados.

1. Ligação pilar-viga com soldadura de topo do banzo, com rotura no pé da soldadura

$$\Delta\sigma_c = 80N/mm^2 \text{ (Detalhe 1, Tabela 8.5 de [27])}$$

2. Ligação pilar-viga com soldadura de topo do banzo, com rotura na raiz da soldadura

$$\Delta\sigma_c = 36N/mm^2 \text{ (Detalhe 3, Tabela 8.5 de [27])}$$

3. Ligação pilar-viga com soldadura de topo da alma, com rotura no pé da soldadura

$$\Delta\sigma_c = 100N/mm^2 \text{ (Detalhe 5, Tabela 8.2 de [27])}$$

4. Ligação pilar-viga com soldadura de topo da alma, com rotura na raiz da soldadura

$$\Delta\sigma_c = 80N/mm^2 \text{ (Detalhe 8, Tabela 8.5 de [27])}$$

5. Viga de caminho de rolamento, sujeita a momento fletor

$$\Delta\sigma_c = 160N/mm^2 \text{ (Detalhe 2, Tabela 8.1 de [27])}$$

## 6. Parafuso sujeito a esforço de tração

$$\Delta\sigma_c = 50N/mm^2 \text{ (Detalhe 14, Tabela 8.1 de [27])}$$

## 7. Soldadura longitudinal contínua entre carril e banzo superior, com rotura na raiz da soldadura

$$\Delta\sigma_c = 80N/mm^2 \text{ (Detalhe 8, Tabela 8.5 de [27])}$$

Os detalhes selecionados focam-se essencialmente na rotura da soldadura ao nível do pé e da raiz da mesma. Contudo, a iniciação pode dar-se por falhas internas da estrutura do material ao nível do grão em zonas não soldadas.

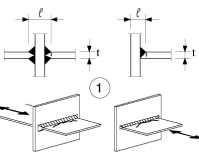
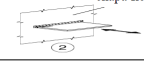
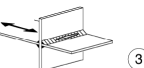
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	$t < 50$ mm	qualquer $t$ [mm]		<p><b>Ligações em cruz e em T:</b></p> <p>1) Rotura da base em todas as soldaduras de topo com penetração total e em todas as juntas de penetração parcial.</p> <p>2) Para o cálculo de <math>\Delta\sigma</math>, utiliza-se a tensão nominal modificada.</p> <p>3) Nas ligações de penetração parcial, são requeridas duas verificações da fadiga. Em primeiro lugar, avalia-se a fissuração da raiz de acordo com as tensões definidas na secção 5, utilizando a categoria 36° para <math>\Delta\sigma_w</math> e a categoria 80 para <math>\Delta\sigma_r</math>. Em segundo lugar, avalia-se a fissuração superficial determinando <math>\Delta\sigma</math> na chapa de apoio.</p>
71	$50 < t \leq 80$	qualquer $t$ [mm]		
63	$80 < t \leq 100$	qualquer $t$ [mm]		
56	$100 < t \leq 120$	qualquer $t$ [mm]		
56	$t > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < t \leq 200$	$t > 20$		
45	$200 < t \leq 300$	$t > 30$		
40	$t > 300$	$30 < t \leq 50$		
Como o pormenor 1) do Quadro 8.5			2) Rotura no bordo da base do acessório; a concentração de tensões nas extremidades das soldaduras é devida à flexibilidade da chapa de apoio.	<p>Pormenores 1) a 3): A falta de alinhamento das chapas solicitadas não deverá exceder 15 % da espessura da chapa intermédia.</p>
36°			3) Rotura da base em soldaduras de topo em T com penetração parcial ou em soldaduras de ângulo e de topo em T, de acordo com a Figura 4.6 da EN 1993-1-8:2005.	

Figura 2.16: Pormenores 1 e 2, adaptado de [27]

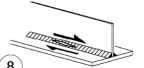
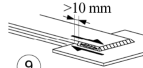
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
80 $m=5$	 	<p>8) Soldaduras de ângulo contínuas transmitindo corte, como nas soldaduras alma-banzo em vigas compostas.</p> <p>9) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	<p>8) <math>\Delta t</math> calculado com base na área da secção bissectriz.</p> <p>9) <math>\Delta t</math> calculado com base na área da secção bissectriz considerando o comprimento total da soldadura. Extremidades do cordão a mais de 10 mm do bordo da chapa, ver também 4) e 5) acima.</p>

Figura 2.17: Pormenor 3, adaptado de [27]

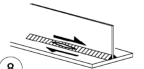
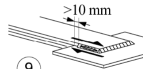
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
80 $m=5$	 	<p>8) Soldaduras de ângulo contínuas transmitindo corte, como nas soldaduras alma-banzo em vigas compostas.</p> <p>9) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	<p>8) <math>\Delta t</math> calculado com base na área da secção bissectriz.</p> <p>9) <math>\Delta t</math> calculado com base na área da secção bissectriz considerando o comprimento total da soldadura. Extremidades do cordão a mais de 10 mm do bordo da chapa, ver também 4) e 5) acima.</p>

Figura 2.18: Pormenores 4 e 7, adaptado de [27]

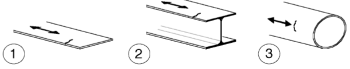
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
160	<p><b>NOTA:</b> A curva de resistência à fadiga associada à categoria 160 é a mais elevada. Nenhum pormenor pode atingir uma melhor resistência à fadiga seja qual for o número de ciclos.</p> 	<p><u>Produtos laminados ou extrudidos:</u></p> <p>1) Chapas e barras com bordos laminados.  2) Perfis laminados com bordos laminados.  3) Secções tubulares sem costura, rectangulares ou circulares.</p>	<p><u>Pormenores 1) a 3):</u></p> <p>Arestas vivas, imperfeições superficiais e de laminação melhoradas por rectificação até à sua eliminação e obtenção de uma transição suave.</p>

Figura 2.19: Pormenor 5, adaptado de [27]

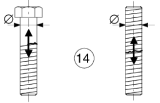
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
50	<p>efeito de dimensão para <math>t &gt; 30</math> mm:  <math>k_t = (30/t)^{0.25}</math></p> 	<p>14) Parafusos e varizes traccionados com rosca laminada ou executadas por corte.  Para grandes diâmetros (cavilhas de fixação), o efeito de dimensão é tido em conta com <math>k_c</math>.</p>	<p>14) <math>\Delta\sigma</math> calculado em relação à secção traccionada não rosca do parafuso.  São tidas em conta a flexão e a tracção resultantes do efeito de alavanca e as tensões de flexão resultantes de outros efeitos.  Para os parafusos pré-esforçados, poderá ser tida em conta a redução do intervalo de tensões.</p>

Figura 2.20: Pormenor 6, adaptado de [27]

## 2.6 Teoria da mecânica da fratura

Nesta secção apresenta-se uma abordagem simplificada e de enquadramento da teoria da mecânica da fratura, embora a mesma não seja diretamente aplicada no presente trabalho. Pretende-se dar a conhecer esta teoria, muito utilizada em outras especialidades da engenharia. É também de salientar que esta abordagem é utilizada para avaliação à rotura frágil [26], servindo para seleção no tipo de entrega dos aços estruturais, como se indica na Secção 3.3 do presente trabalho.

A teoria da mecânica da fratura tem como base o estudo do comportamento de uma fenda e a sua propagação, podendo ser aplicada na avaliação da vida útil de fadiga. É tida em conta a presença de defeitos no material ou mesmo fendas já existentes. O parâmetro que quantifica o estado de tensão na vizinhança de uma fenda designa-se por fator de intensidade de tensão,  $K$ , sendo dado pela seguinte equação [9]:

$$K = Y\sigma(\pi a)^{1/2} \quad (2.13)$$

onde,

$Y$  é um fator de correção geométrico;

$\sigma$  é a tensão nominal;

$a$  é o comprimento da fenda.

Um valor de  $K$  negativo representa tensões de compressão que não são contabilizadas no histórico de tensões (pois compressões têm um efeito de fecho de fendas). Assim, apenas tensões de tração levam à propagação de fendas.

Existem três modos de propagação de fendas num material, com a designação de I, II e III: modo de abertura, modo de deslizamento e modo de corte, respetivamente, com os correspondentes fatores de intensidade de tensão  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$ . Estes modos são apresentados esquematicamente na Figura 2.21.

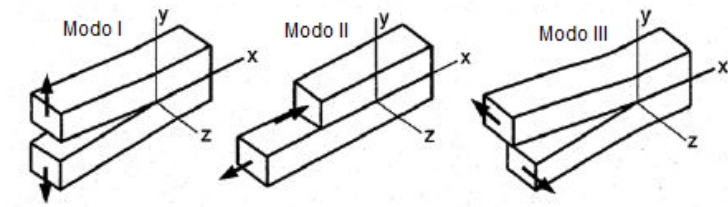


Figura 2.21: Modos de abertura de uma fenda, adaptado de [9].

A avaliação da vida útil de fadiga por meio da teoria da mecânica da fratura baseia-se na relação entre a variação de intensidade de tensão  $\Delta K$  e a taxa de crescimento de fendas de fadiga,  $da/dN$ , proposta por *Paris*, sendo expressa por:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.14)$$

onde,

$\frac{da}{dN}$  é a extensão de uma fenda por ciclo;

$C$  é uma constante;

$m$  é o declive da reta  $\frac{da}{dN}$ ;

$\Delta K$  é a diferença entre as tensões máximas e mínimas de cada ciclo.

Na Figura 2.22 é apresentada a evolução do crescimento de uma fenda, indicando os estágios da mesma, em função de  $\Delta K$ .

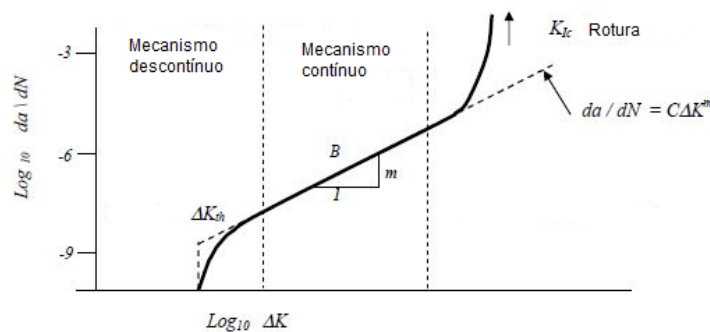


Figura 2.22: Taxa de propagação de uma fenda, adaptado de [29].

O aparecimento de uma fenda por fadiga dá-se, normalmente, à superfície do material, pois é aí que habitualmente se geram as tensões locais mais elevadas, dado que os cristais do material carecem de um apoio mútuo relativamente ao seu interior e existem também efeitos do meio ambiente que podem ser prejudiciais.

Uma vez iniciada a fenda, esta desenvolve-se gradualmente segundo um ângulo de  $45^\circ$  em relação ao plano da superfície e progride de acordo com defeitos microscópicos à escala do grão, como se pode observar na Figura 2.23.

O crescimento da fenda desenvolve-se segundo um plano de tensão normal máximo até se atingir um valor crítico, ocorrendo rotura instável final quando a área é insuficiente para suportar a carga aplicada.

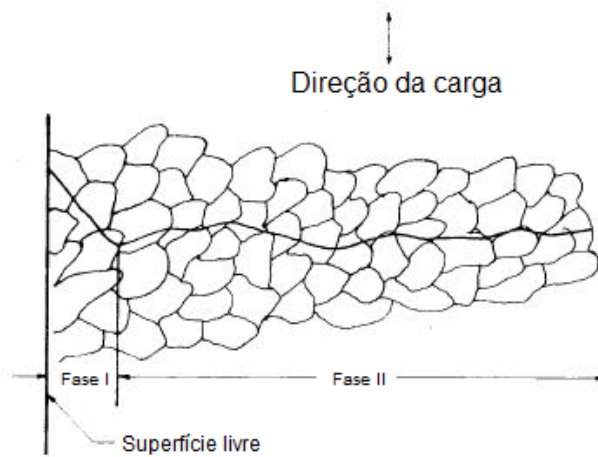


Figura 2.23: Exemplo de propagação de uma fenda, adaptado de [17].

A iniciação de nucleação de uma fenda relaciona-se também com o número de ciclos de carga, pois ao atingir-se um dado número de ciclos entra-se na fase de propagação da fenda.

A fissuração inicia-se lentamente mas, com o aumentar da dimensão da fenda, o crescimento e propagação da abertura torna-se exponencial, conforme representado na Figura 2.24.

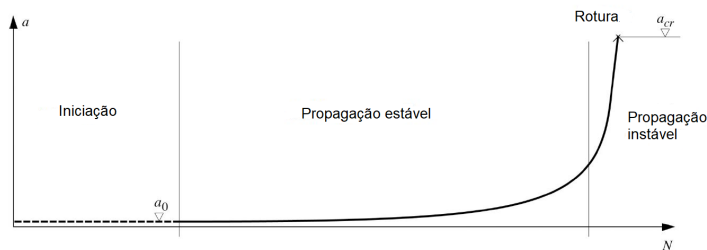


Figura 2.24: Relação entre  $N$  e o comprimento da fissura, adaptado de [18].



## Capítulo 3

# Suscetibilidade dos aços à fadiga - Aspectos metalúrgicos na produção do aço

### 3.1 Considerações gerais

O presente capítulo visa apresentar as propriedades mais importantes do aço estrutural e da sua microestrutura de forma a melhor compreender a razão pela qual existem qualidades de aço que melhor se adequam ao dimensionamento de estruturas de suporte de pontes rolantes, visto as ações cíclicas influenciarem fortemente a resistência do material quanto à rotura frágil.

Sob condições específicas de serviço, as estruturas metálicas são sensíveis à rotura frágil, especialmente em ligações soldadas. O projetista deve estar familiarizado com propriedades dos aços de forma a selecionar o tipo de aço mais adequado a cada projeto. Condições de serviço, como a temperatura e o estado de tensão, estão intimamente ligadas com a microestrutura do material e a forma como este se comporta sob solicitações repetidas.

### 3.2 Propriedades do aço estrutural

O aço estrutural é uma liga de ferro, carbono e outros elementos, contendo algumas impurezas inevitáveis ou adições propositadas.

As propriedades mecânicas e tecnológicas do aço dependem fortemente da sua composição química, sendo o carbono um dos constituintes mais influentes.

Na Europa, os aços laminados devem estar em conformidade com [34], especificando a composição química, propriedades mecânicas (tensão de rotura e tensão de cedência, entre outras), propriedades tecnológicas (soldabilidade), propriedades de superfície, dimensões e massa. A quantificação de algumas propriedades mecânicas do aço é fundamental para o dimensionamento de estruturas metálicas.

Os valores de cálculo adotados para o aço estrutural, de acordo com [24], são:

- Módulo de elasticidade:  $E = 210000N/mm^2$
- Peso específico:  $\gamma = 78,50kN/m^3$

- Coeficiente de *Poisson*:  $\nu = 0,3$
- Módulo de distorção:  $G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \approx 81000 \text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de dilatação térmico:  $\alpha = 12 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{K}$

As propriedades mecânicas dos aços podem ser definidas através de uma curva típica  $\sigma - \varepsilon$  para aços laminados (Figura 3.1), que é obtida com base em ensaios de tensão uniaxial, de acordo com [34].

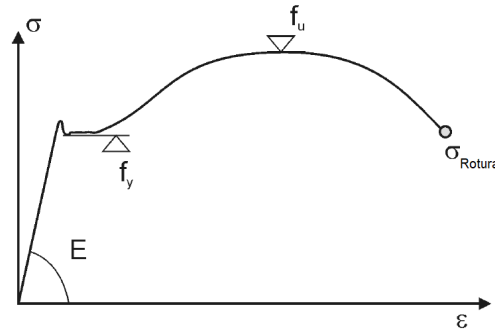


Figura 3.1: Diagrama  $\sigma$ - $\varepsilon$  de aços laminados, adaptado de [34].

### 3.3 Rotura frágil

O aço estrutural é um material dúctil que sob condições específicas, pode apresentar um comportamento frágil com rotura súbita provocada pela formação e propagação de fendas.

De forma a evitar esse fenómeno, é necessária a escolha adequada de um aço com maior resistência à rotura frágil, isto é, com maior tenacidade <sup>1</sup>.

A tenacidade é medida pelo ensaio de impacto de *Charpy* [26] no qual um provete com condições predefinidas é submetido ao impacto de um pêndulo. Com base na energia de rotura absorvida estabelece-se uma temperatura de referência,  $T_{Ed}$ , definida em geral como a temperatura correspondente a uma energia absorvida de  $27 \text{ J}$  (Figura 3.2), e que representa uma temperatura de transição entre os domínios de comportamento frágil e dúctil do aço.

Este parâmetro é importante para a fadiga visto que um aço dúctil sujeito a um aumento da velocidade de deformação pode tornar-se frágil. Assim, ações dinâmicas podem ser responsáveis por roturas frágeis [28].

<sup>1</sup>Tenacidade - capacidade de resistir à propagação de fendas sob tensões de tração.

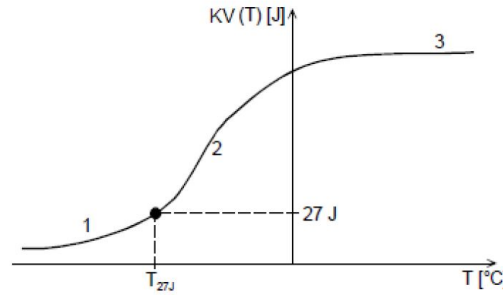


Figura 3.2: Relação entre energia de impacto e temperatura, adaptado de [26].

De acordo com a norma [26] os aços estruturais são divididos em várias subclasses (ver Tabela 3.1) consoante as suas características de tenacidade, medidas pelo ensaio de *Charpy*, e microestrutura.

Tabela 3.1: Designação de subclasses do aço, adaptada de [7]

Subclasse	Energia absorvida (mínima)	
JR	27J a 20°C	
J0	27J a 0°C	
J2	27J a -20°C	
K2	40J a -20°C	Aumento da resistência à rotura frágil
M, N	27J a -30°C	
QL	30J a -40°C	
ML, NL	27J a -50°C	
QL1	30J a -60°C	

Segundo a abordagem de cálculo apresentada em [26], as condições de serviço são influenciadas pela tensão de cálculo  $\sigma_{Ed}$  e pela temperatura mínima de projeto, fazendo com que os elementos estruturais não possam exceder uma espessura máxima admissível, visto que o processo de laminagem origina que as tensões de cedência e última sejam influenciadas pela espessura [28].

A rotura frágil é considerada como estando associada a uma combinação acidental de ações, cuja quantificação, apresentada na secção 5 do presente trabalho, é dada pela expressão 5.3.

As tensões de dimensionamento variam com a espessura dos elementos, sendo determinadas pela expressão [26]:

$$f_y(t) = f_{y,nom} - 0.25 \frac{t}{t_0} \quad (3.1)$$

Em que:

$t$  é a espessura do elemento;

$t_0$  é a espessura de referência, tomada como 1 mm.

Sendo a tensão de cedência do aço dependente da espessura das peças; o valor adotado para  $f_y(t)$  pode ser obtido pela Tabela 3.2 [7].

Tabela 3.2: Valor de dimensionamento de  $f_y$ , adaptado de [7].

	Classe	$f_y[N/mm^2]$ para espessura nominal $t$ (mm)			
		$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$
Secções laminadas	S275	275	265	255	245
	S355	355	345	335	325

Em [7] é apresentada uma metodologia de seleção da subclasse do aço baseada na BS EN 1993-1-10, onde os valores da espessura máxima dos elementos dependem do nível de tensão instalado, calculado pela relação  $\sigma_{Ed}/f_y$  na estrutura e do tipo de pormenor estrutural considerado, sendo necessário considerar previamente uma temperatura de serviço no projeto,  $T_{Ed}$ . Podem ser adotadas temperaturas de referência padrão, consideradas em Portugal, para interior de edifícios (temperatura mínima de serviço,  $-5^\circ C$ ), para o exterior de edifícios (temperatura mínima de serviço,  $-15^\circ C$ ) e para pontes (temperatura mínima de serviço,  $-20^\circ C$ ), simplificando o cálculo relativamente complexo de obtenção de  $T_{Ed}$ .

Caso as temperaturas de referência não sejam as indicadas acima, é possível proceder a interpolações dos valores. Para uma dada temperatura de referência e um nível de tensões é possível obter a espessura dos elementos que garante a resistência à rotura frágil, como se observa na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Espessura máxima do aço para uma temperatura de referência de  $-15^\circ C$ , adaptado de [7]

Tipo de detalhe		Nível de tensão, $\sigma_{Ed}/f_y(t)$									
Descrição	$\Delta T_{RD}$										
	$+30^\circ C$	$\leq 0$	0.15	0.3	$\geq 0.5$						
Parafusos	$+20^\circ C$		$\leq 0$	0.15	0.3	$\geq 0.5$					
Soldadura - moderada	$0^\circ C$				$\leq 0$	0.15	0.3	$\geq 0.5$			
Soldadura - severa	$-20^\circ C$						$\leq 0$	0.15	0.3	$\geq 0.5$	
Soldadura - muito severa	$-30^\circ C$							$\leq 0$	0.15	0.3	$\geq 0.5$
Classe do aço	Qualidade	Espessura máxima de acordo com o nível de tensão e o tipo de detalhe									
S355	JR	45	37.5	30	22.5	17.5	15	12.5	10	7.5	5
	J0	120	100	82.5	67.5	55	45	37.5	30	22.5	17.5
	J2	167.5	142.5	120	100	82.5	67.5	55	45	37.5	30
	N, M, K2	190	167.5	142.5	120	100	82.5	67.5	55	45	37.5
	NL, ML	200	200	190	167.5	142.5	120	100	82.5	67.5	55

### 3.4 Relação entre fadiga e microestrutura do aço

A escolha da qualidade do aço não está apenas ligada ao seu comportamento mecânico, mas também à microestrutura do material, resulta do processo de produção [8].

Um fator de extrema importância e que condiciona a escolha da qualidade do aço, é o efeito do tamanho do grão do aço com efeito, após diversos estágios do processo de produção, o tamanho final do grão é um fator determinante das propriedades finais do aço.

Os aços de grão refinado apresentam melhor tenacidade e melhor ductilidade devido a estarem sujeitos, no seu processo de fabrico, a variações de temperatura mais baixas comparativamente aos aços de grão grosseiro. Assim, apresentam menor tendência de propagação de fendas e tensões residuais menores.

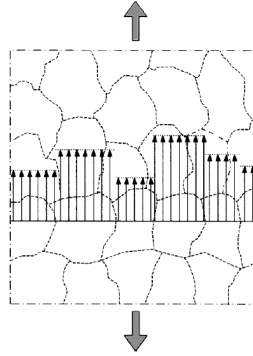


Figura 3.3: Tensões na microestrutura do aço

O facto do grão ser refinado faz com que as tensões em cada cristal diminuam, e se dificulte o "caminho" que uma potencial fenda poderia tomar (Figura 3.3). A redução do tamanho do grão leva a um aumento da superfície específica das fronteiras do grão, as quais representam um obstáculo à deformação, pelo que a tensão de cedência aumenta. Os tipos de aço cujo tamanho do grão é refinado são denominados como aços normalizados (designados por **N** e **NL**), e aços termomecânicos, (designados por **M** ou **ML**).

Outro fator que influencia a resistência microestrutural do aço e afeta a propagação de fendas é a pureza do aço, ou seja, a presença de inclusões não metálicas tem geralmente efeitos prejudiciais no comportamento do aço à fadiga, particularmente para solicitações de longa duração. Contudo, este parâmetro não constitui a causa principal de rotura por fadiga [5].

### 3.4.1 Aços com menor suscetibilidade à fadiga

O processo (fabricação, têmpera, tratamento de superfície, acabamento) e o ambiente em serviço influenciam o comportamento final de um aço submetido a cargas cíclicas. É complicado prever a vida de fadiga de metais pois estes são sensíveis a pequenas alterações nas condições de carregamento e concentração de tensões.

Os aços correntemente considerados como menos suscetíveis à fadiga são os aços normalizados, e os aços termomecânicos de grão fino, cuja principal vantagem é a redução do tempo de pré-aquecimento para a soldadura [28].

#### 3.4.1.1 Aços normalizados (N e NL)

Em estruturas sujeitas frequentemente a ações de impacto ou que requeiram alta tenacidade são utilizados habitualmente aços normalizados.

A normalização é um processo de tratamento térmico que tem como objetivo diminuir/refinar o nível do grão do aço (pois o grão fino é mais resistente do que o grão grosseiro) [30]. Deste processo resulta uma melhoria na ductilidade e tenacidade do aço, bem como uma homogeneização da microestrutura que reduz as irregularidades devidas a laminagem ou a soldadura.

### 3.4.1.2 Aços termomecânicos (M e ML)

O processo termomecânico é uma técnica desenvolvida para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais através de um processo controlado de deformação a quente, através de uma sequência de sucessivos arrefecimentos acelerados e têmperas diretas [31].

Este tratamento térmico reduz a produtividade do processo de laminagem mas traz benefícios ao comportamento do aço quando submetido a ações cíclicas, nomeadamente:

- Melhoria na soldabilidade <sup>2</sup>;
- Aumento da tenacidade e ductilidade;
- Redução do tamanho do grão;
- Redução de tensões residuais.

Com estas características, é possível produzir aços laminados com propriedades finais adaptadas aos requisitos de projeto de estruturas sujeitas a cargas cíclicas.

## 3.5 Técnicas de melhoramento de soldadura

Os métodos de melhoramento de soldadura são tratamentos aplicados de forma a aumentarem a resistência à fadiga em ligações soldadas, resultando num aumento das curvas S-N. A eficácia destes métodos depende em grande parte da técnica e desempenho do operador, bem como de inspeções periódicas.

Com estas técnicas pretende-se:

- Aumentar a resistência à fadiga de estruturas novas
- Proceder à reparação e melhoramento de estruturas existentes

De acordo com [21], estas técnicas aplicam-se a qualquer soldadura de arco sujeita a ações de fadiga e a qualquer qualidade de aço estrutural até uma tensão de de rotura de 900 MPa, exceto para ciclos de fadiga oliglóclicos, onde as variações de tensão  $\Delta\sigma > \sigma_y$ .

### 3.5.1 Tipos de ligações soldadas

As recomendações de melhoramento de ligações soldadas aplicam-se para chapas de aço de 6 a 150 mm de espessura, e os melhoramentos indicados em [21] aplicam-se essencialmente ao pé da soldadura. Portanto, prevê-se apenas o aumento da vida de fadiga de soldaduras tratadas do ponto de vista de uma potencial rotura a partir do seu pé.

Na Figura 3.4 apresentam-se alguns exemplos de fendas no pé da soldadura.

---

<sup>2</sup>Soldabilidade - Propriedade de dois metais se unirem quando elevados a temperaturas de fusão

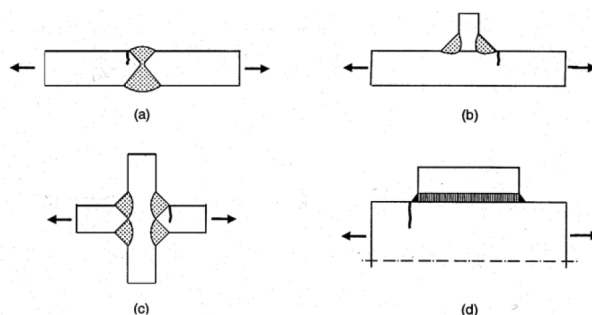


Figura 3.4: Rotura no pé da soldadura, adaptado de [21]

Não obstante, deve ser considerada a possibilidade do início de rotura ocorrer noutra local da soldadura, por exemplo, a origem das fendas pode dar-se na raiz da soldadura (Figura 3.5). Nessa situação, o alcance das técnicas de melhoramento de soldaduras à fadiga é reduzido ou mesmo não aplicável [21]. As fendas por fadiga iniciadas na raiz regem-se por curvas de dimensionamento diferentes; por isso, qualquer tratamento no pé da soldadura não é expectável que implique um melhoramento noutras zonas da soldadura.

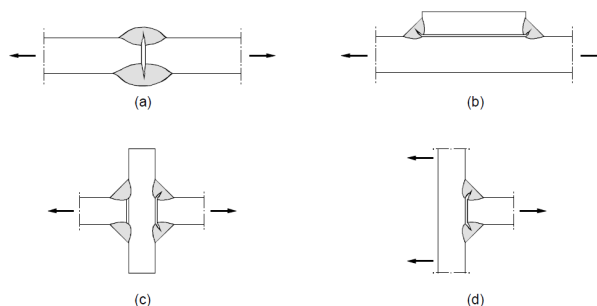


Figura 3.5: Rotura na raiz da soldadura, adaptado de [21]

#### 3.5.1.1 Modificação da geometria do pé da soldadura

O pé da soldadura é uma das fontes de fendas por fadiga, pois a sua geometria agrava as concentrações de tensão. O objetivo da técnica de modificação da geometria do pé da soldadura passa pela remoção ou redução de micro fendas, retardando a iniciação de fendas por fadiga. Um objetivo secundário, mas não menos importante, é a redução de pontos de concentração de tensão devidos ao perfil da soldadura, tendo em vista uma transição suave entre o material base e a face da soldadura.

##### 3.5.1.1.1 Burr Grinding

O objetivo desta técnica passa pela remoção ou redução, através de moagem, do pé da soldadura, onde é suscetível o aparecimento e propagação de fendas. Ao mesmo tempo, é reduzido o efeito de concentração de tensões locais na soldadura.

- Procedimento

A eficácia do método depende da capacidade técnica do operador, bem como da preparação adequada da soldadura, que deve ser previamente limpa. O procedimento é ilustrado na Figura 3.6.

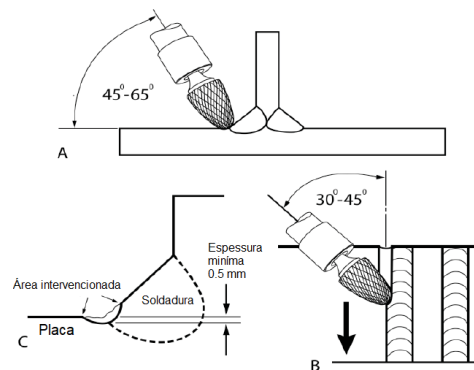


Figura 3.6: Técnica de moagem do pé da soldadura, adaptado de [15]

A rebarbadora é centrada sobre o pé da soldadura, com uma inclinação de 45° a 60° com a chapa de base (Figura 3.6, A) e cerca de 30° a 45° na direção longitudinal da soldadura (Figura 3.6, B). A rebarbadora é empurrada ao longo da soldadura criando um sulco retilíneo e de profundidade regular (Figura 3.6, C), com espessura mínima de 0,5 mm e máxima de 2 mm ou 7% da espessura da chapa [21]. A moagem deve ser levada até zonas de menor concentração de tensões.

- Moagem em duas fases

Em casos de soldaduras de ângulo ou de topo íngremes em placas espessas, para as quais são necessárias rebarbadoras de maior diâmetro, estas têm tendência a "subir" até à face da soldadura, dificultando o posicionamento do equipamento na linha do pé [21].

Nestas situações, recomenda-se que o processo seja levado a cabo em duas fases distintas. Inicialmente, aplica-se uma rebarbadora esférica e pequena (6 mm de diâmetro) para estabelecer um sulco com a posição e profundidade correta; posteriormente, termina-se o processo com uma rebarbadora cilíndrica de maior diâmetro, como é apresentado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Faseamento de moagem de soldaduras íngremes, adaptado de [21]

- Resistência à fadiga de ligações melhoradas por *burr grinding*



Os benefícios deste método são aplicáveis apenas para  $\Delta\sigma_C \leq 90 \text{ N/mm}^2$ . Esta limitação deve-se ao facto de que classes superiores correspondem a detalhes não soldados cuja vida à fadiga não é influenciada por ligações soldadas [21].

Para categorias iguais ou inferiores a  $90 \text{ N/mm}^2$ , o benefício corresponde a um aumento de variação de tensão de um fator de 1.5, passando o limite de fadiga a ser estabelecido para  $100 \text{ N/mm}^2$ , como se pode observar na Figura 3.8 [21].

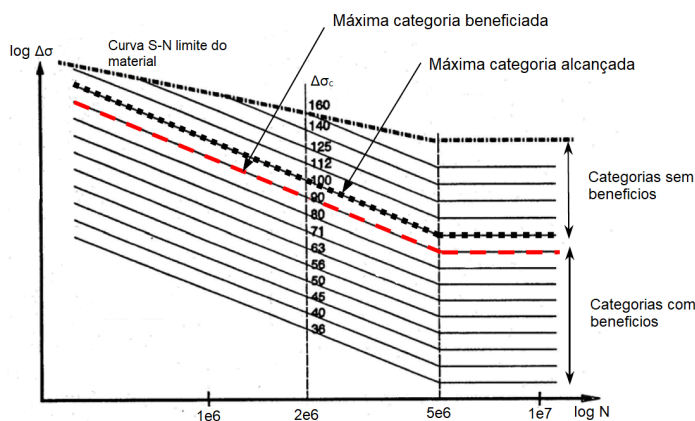


Figura 3.8: Benefícios do *Burr Grinding* nas curvas S-N, adaptado de [21]

#### 3.5.1.1.2 TIG Dressing

Esta técnica visa remover falhas que possam ocorrer no pé da soldadura através do derretimento do material no pé e também promover a redução do efeito das concentrações de tensão, suavizando a transição entre a placa de material base e a face da soldadura.

As seguintes especificações não se aplicam a ligações a placas de aço com menos de 6 mm de espessura.

- Preparação da soldadura

O *TIG Dressing* é sensível à maioria dos tipos de contaminantes de soldadura, tais como ferrugem, óleos e tintas. A soldadura e a placa de base devem ser completamente limpas. Uma limpeza insuficiente das mesmas pode resultar na formação de bolsas de gás, causando efeitos prejudiciais na resistência à fadiga.

- Procedimento

A tocha deve ser aplicada com uma inclinação de  $60^\circ$  a  $90^\circ$ , como é apresentado na Figura 3.9 (a), e uma inclinação de  $10^\circ$  no sentido longitudinal da soldadura, Figura 3.9 (b), para garantir um adequado escudo do gás.

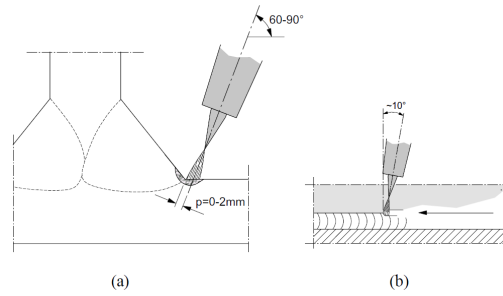


Figura 3.9: Posicionamento da tocha de *TIG Dressing*, adaptado de [21]

Para um resultado otimizado, a zona derretida deve estar cuidadosamente posicionada com o pé da soldadura. O resultado ótimo é obtido quando o centro do arco é colocado a curta distância (entre 0,5 e 1,5 mm) do pé da soldadura [21], como é ilustrado na Figura 3.10.

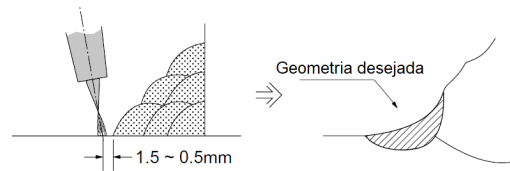


Figura 3.10: Resultado da tocha de *TIG Dressing*, adaptado de [21]

- Resistência à fadiga de ligações melhoradas por *TIG dressing*

Os benefícios deste método são aplicáveis apenas para  $\Delta\sigma_C \leq 90 \text{ N/mm}^2$ . Esta limitação deve-se ao facto de que classes superiores correspondem a detalhes não soldados cuja vida à fadiga não é influenciada por ligações soldadas [21].

Para categorias iguais ou inferiores a  $90 \text{ N/mm}^2$ , o benefício corresponde a um aumento de variação de tensão de um fator de 1.5, passando o limite de fadiga a ser estabelecido para  $100 \text{ N/mm}^2$ , como se pode observar na Figura 3.11 [21].

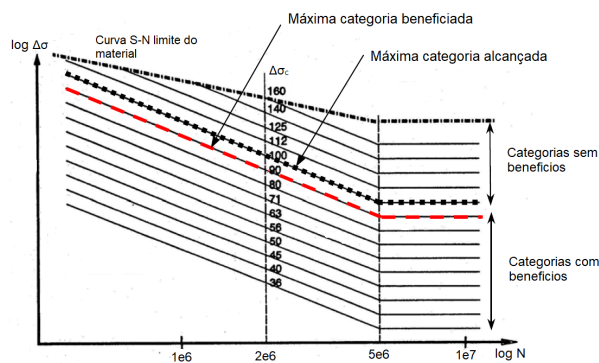


Figura 3.11: Benefícios do *TIG Dressing* nas curvas S-N, adaptado de [21]

### 3.5.1.2 Técnica de introdução de tensões residuais de compressão

Esta abordagem de melhoramento de vida à fadiga passa pela introdução de tensões residuais de compressão na região do pé da soldadura, resultantes do processo de soldadura. As técnicas seguidamente apresentadas induzem deformações plásticas na zona aplicada.

Uma limitação prática relacionada com estas técnicas prende-se com as tensões médias atuantes, isto é, estes métodos não são adequados para estruturas sujeitas a tensões acima de 80% da tensão de cedência [21].

#### 3.5.1.2.1 *Hammer Peening*

Esta técnica consiste na indução repetida de deformações na soldadura através de um martelo, introduzindo tensões residuais de compressão no pé da soldadura. As especificações indicadas em [21] não são aplicáveis a chapas de aço com menos de 4 mm de espessura.

- Procedimento

Este método requer um posicionamento adequado do martelo sobre a zona a tratar para que os metais de ambos os lados (soldadura e material base) sofram deformações.

A ponta do martelo deve ter uma inclinação entre  $60^\circ$  a  $80^\circ$  com a chapa de base (Figura 3.12 (a)) e ser aproximadamente perpendicular à direção longitudinal da soldadura (Figura 3.12 (b)).

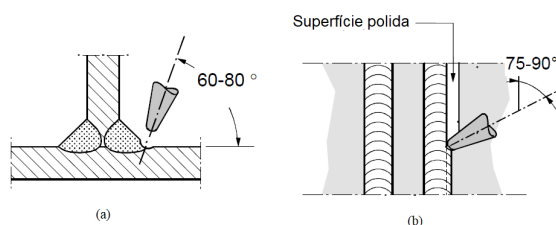


Figura 3.12: Procedimento do *Hammer Peening*, adaptado de [21]

A velocidade de aplicação depende do espaço de acesso para a realização do procedimento e do respetivo equipamento. O diâmetro da ponta do martelo influencia o acabamento final da superfície, sendo que, quando o mesmo é superior a 12 mm, habitualmente não afeta o pé da soldadura. O resultado da aplicação do método deve garantir uma transição suave e livre de indentações individuais.

Refira-se ainda que, caso a soldadura tratada esteja sujeita a tensões de tração elevadas, este método apresenta poucos benefícios [21].

- Resistência à fadiga de ligações melhoradas por *hammer peening*

Os benefícios deste método são aplicáveis apenas para  $\Delta\sigma_C \leq 90 \text{ N/mm}^2$ . Esta limitação deve-se ao facto de que classes superiores correspondem a detalhes não soldados cuja vida à fadiga não é influenciada por ligações soldadas [21].

Para categorias iguais ou inferiores a  $90 \text{ N/mm}^2$ , o benefício corresponde a um aumento de variação de tensão de um fator de 1.5, passando o limite de fadiga a ser estabelecido para  $125 \text{ N/mm}^2$ , como se pode observar na Figura 3.13 [21].

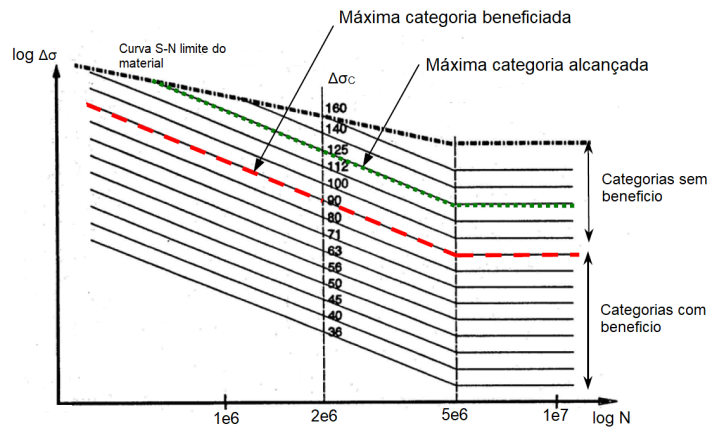


Figura 3.13: Benefícios do *Hammer Peening* nas curvas S-N, adaptado de [21]

É expectável que o método atinja os mesmos resultados que o *Burr Grinding* e o *TIG Dressing*, isto é,  $1,5 \cdot \Delta\sigma$ , limitado a  $100 \text{ N/mm}^2$ .

Devido à sensibilidade das ligações soldadas afetadas por este método, as curvas S-N apenas podem ser aplicadas nas seguintes circunstâncias:

- Quando a máxima tensão nominal de compressão do espectro de carga é menor que  $0,25 \cdot \sigma_y$ ;
- Quando o rácio de tensões aplicadas é negativo,  $R < 0$ , as curvas S-N são utilizadas em conjunto com a variação de tensões totais;
- Quando o rácio é positivo,  $R \geq 0$ , a curva S-N é utilizada em conjunto com as tensões máximas em vez da variação de tensões totais.

### 3.5.1.2.2 Needle Peening

Nesta técnica, as tensões residuais de compressão são induzidas pela aplicação repetida de um conjunto de pequenas agulhas introduzidas por um martelo no pé da soldadura.

Comparativamente ao *hammer peening*, este método é mais adequado quando for necessário tratar áreas maiores (perfis tubulares). As especificações restringem-se a chapas com 4 mm de espessura mínima.

- Procedimento

O objetivo desta técnica passa pela deformação plástica do material no pé da soldadura de forma a induzir tensões residuais de compressão na soldadura. O tratamento requer um posicionamento razoavelmente preciso das agulhas sobre o pé da soldadura para que as partes pretendidas sejam intervencionadas.

O *needle peening* pode ser executado imediatamente na soldadura enquanto esta se encontra quente, se necessário.

- Resistência à fadiga de ligações melhoradas por *needle peening*

Os benefícios deste método são aplicáveis apenas para  $\Delta\sigma_C \leq 90 N/mm^2$ . Esta limitação deve-se ao facto de que classes superiores correspondem detalhes não soldados cuja vida à fadiga não é influenciada por ligações soldadas [21].

Para categorias iguais ou inferiores a  $90 N/mm^2$ , o benefício corresponde a um aumento de variação de tensão de um fator de 1.5, passando o limite de fadiga a ser estabelecido para  $125 N/mm^2$ , como se pode observar na Figura 3.14 [21].

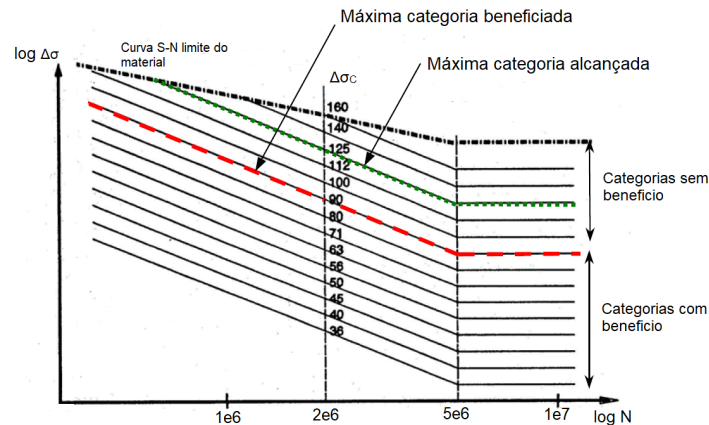


Figura 3.14: Benefícios do *Needle Peening* nas curvas S-N, adaptado de [21]

Devido à sensibilidade das ligações soldadas afetadas por este método, as curvas S-N podem apenas ser aplicadas nas seguintes circunstâncias:

- Quando a máxima tensão nominal de compressão do espectro de carga é menor que  $0,25 \cdot \sigma_y$ ;
- Quando o rácio de tensões aplicadas é negativo,  $R < 0$ , as curvas S-N são utilizadas em conjunto com a variação de tensões totais;
- Quando o rácio é positivo,  $R \geq 0$ , a curva S-N é utilizada em conjunto com as tensões máximas em vez da variação de tensões totais.



## Capítulo 4

# Caracterização de gruas móveis

### 4.1 Enquadramento geral

O presente capítulo visa realizar uma breve descrição sobre os tipos de equipamentos de movimentação de cargas, existentes em edifícios industriais.

A escolha do equipamento a utilizar depende de fatores inerentes às condições, apresentadas em projeto, de laboração da fábrica, estaleiro ou oficina e das cargas a elevar. Fatores como cargas de elevação, espaço de manobra, entre outros posteriormente abordados, são condicionantes para a escolha de equipamentos de movimentação de cargas.

### 4.2 Tipos de gruas

Em edifícios industriais podem ser utilizados diferentes tipos de sistemas de elevação e de movimentação de cargas, dividindo-se em dois grandes grupos — pontes rolantes e pórticos rolantes —, com algumas diferenças, consoante as suas composições construtivas. Assim, distinguem-se os seguintes tipos de gruas:

- Ponte rolante monoviga;
- Mono-rail;
- Ponte rolante biviga;
- Ponte rolante suspensa;
- Ponte rolante em consola;
- Pórtico rolante monoviga;
- Pórtico rolante biviga.

#### 4.2.1 Pontes rolantes

As pontes rolantes são equipamentos de movimentação de carga bastante utilizados em edifícios industriais, por permitirem um grande aproveitamento da área útil do edifício.

Estes equipamentos têm uma trajetória bem definida, circulando sobre uma viga com carril, designada por caminho de rolamento.

Uma ponte rolante é designada por monoviga ou biviga, caso a ponte seja constituída por uma ou duas vigas que, em cada extremidade, são apoiadas em apoios rolantes. A ponte serve de apoio para a movimentação de um carro guincho capaz de suspender as cargas verticais desde o solo até à altura da viga principal. O guincho, designado em inglês por "*Hoist*" é instalado num carro que se desloca ao longo da viga principal.

Estes equipamentos são classificados quanto à sua classe de utilização, relacionando a frequência de utilização, prevista no tempo de vida útil, com o número de ciclos de elevação previstos, e quanto ao seu estado de carga, definindo o nível de carregamento a que a ponte rolante está sujeita.

A referida classificação pode ser feita através da norma [35] ou da norma [12].

Os elementos principais de uma ponte rolante são de seguida enumerados, com a respetiva indicação na Figura 4.1.

1. Ponte:

É o elemento principal de movimentação de translação, que cobre o vão útil de trabalho. Denomina-se monoviga ou biviga, se for constituída por uma viga ou duas vigas, respetivamente.

2. Cabeceira:

A cabeceira está localizada na extremidade da viga da ponte, onde estão fixadas as rodas, acionadas por um motor elétrico. As rodas movem-se sobre os carris do caminho de rolamento.

3. Carro guincho:

O carro guincho movimenta-se segundo a viga da ponte rolante. É o mecanismo que suporta o sistema de elevação de cargas, sendo responsável pelo movimento transversal e vertical da carga.

4. Guincho ("*hoist*"):

O guincho é instalado no carro da ponte, sendo responsável pelo movimento de elevação da carga, por meio de um cabo de aço.

5. Caminho de rolamento

Trata-se do conjunto de vigas laterais onde são apoiadas as cabeceiras, permitindo o movimento longitudinal da ponte rolante ao longo da área útil de utilização do edifício.

6. Botoneira e/ou Controle remoto:

A botoneira e o controle remoto são os dispositivos de controlo de movimento de todo o sistema da ponte rolante.

Estes dois dispositivos servem o mesmo propósito, embora com algumas diferenças.



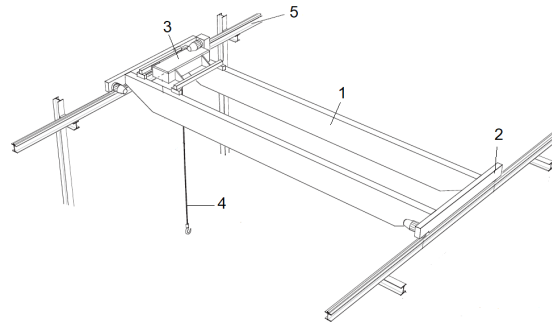


Figura 4.1: Elementos principais de uma ponte rolante, adaptado de [19].

#### 4.2.1.1 Ponte rolante monoviga

Uma ponte rolante monoviga é uma solução que, devido ao seu peso próprio reduzido, permite minimizar as cargas da ponte transmitidas à estrutura de suporte e atingir velocidades elevadas de movimentação, nomeadamente de translação. Este tipo de ponte rolante é constituído apenas por uma viga principal (perfil em "I" ou em caixão), apoiada em cabeceiras (apoios rolantes), que se movem ao longo do caminho de rolamento. Este tipo de equipamento funciona usualmente com um guincho, deslocando-se ao longo do banzo inferior da viga, como se pode observar na Figura 4.2.

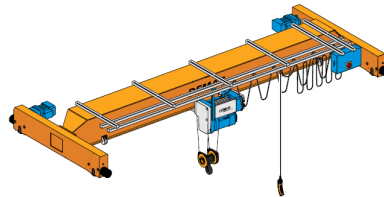


Figura 4.2: Ponte rolante monoviga, adaptado de [1].

#### 4.2.1.2 Monorail

Um sistema monorail é uma solução em que o carro guincho circula no banzo inferior de uma viga estacionária (em suspensão), como representado na Figura 4.3.

Este equipamento é, habitualmente, suportado pela própria estrutura do edifício e o seu percurso, que pode ser retilíneo ou curvo, não permite movimentação transversal mas apenas longitudinal ao longo da viga de suporte.

Esta solução apresenta-se vantajosa, devido à sua velocidade e eficácia no transporte de cargas, em trabalhos repetitivos, cujo local de início e fim do transporte são fixos.



Figura 4.3: Sistema *monorail*, adaptado de [1].

#### 4.2.1.3 Ponte rolante biviga

Uma ponte rolante biviga, representada na Figura 4.4, é constituída por duas vigas principais, apoiadas em cabeceiras (apoios rolantes), que se movimentam ao longo do caminho de rolamento.

Nas vigas principais da ponte circula o carro guincho, de elevação de carga, movimentando-se longitudinalmente ao longo da ponte. Esta solução apresenta maior capacidade de carga, comparativamente às pontes rolantes monoviga.

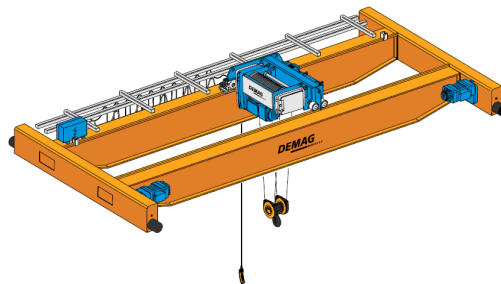


Figura 4.4: Ponte rolante biviga, adaptado de [1].

#### 4.2.1.4 Ponte rolante suspensa

Pontes rolantes suspensas são similares às pontes abordadas anteriormente, com a particularidade de que pontes suspensas circulam segundo o banzo inferior da viga de caminho de rolamento, de acordo com a Figura 4.5.

Esta solução permite um maior aproveitamento da altura disponível para movimentação de cargas, favorecendo o espaço útil do edifício devido ao carro guincho poder percorrer na totalidade o comprimento da viga da ponte. Salienta-se o facto deste tipo de solução se poder combinar, simultaneamente, com outro tipo de pontes rolantes.

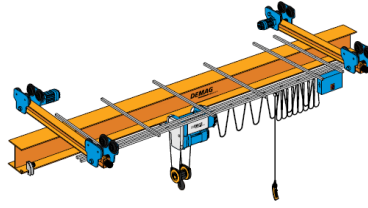


Figura 4.5: Ponte rolante suspensa, adaptado de [1].

#### 4.2.1.5 Pontes rolantes em consola

Pontes rolantes em consola são equipamentos para movimentação de cargas mais reduzidas mas que aumentam o volume de produção num edifício industrial. Este tipo de pontes dispõe do seu próprio caminho de rolamento, podendo coexistir, em simultâneo, com outros tipos de pontes rolantes, e localizar-se debaixo de pontes rolantes de maior porte sem que exista interferência nos respetivos raios de ação, como representado na Figura 4.6.



Figura 4.6: Ponte rolante em consola, adaptado de [1].

#### 4.2.2 Pórticos rolantes

Pórticos rolantes, como o representado na Figura 4.7, são equipamentos que, tal como as pontes rolantes, podem ser constituídos por uma ou duas vigas. A trajetória de um pórtico rolante é efetuada sobre carris ou rodas pneumáticas, conferindo maior liberdade de movimento. O corpo principal é constituído por pórticos que, dependendo do nível de cargas a movimentar, são constituídos por perfis laminados ou perfis em caixão.

O sistema de elevação, bem como a forma de controlo, é semelhante ao das pontes rolantes, com possibilidade de instalação de uma cabina para um controlador na viga ou junto ao carro móvel. Este tipo de equipamento pode atingir vãos até 40m. Estes pórticos apresentam vantagens em relação às pontes rolantes, na medida em que suportam cargas mais elevadas e não necessitam de estruturas de suporte, embora possam interferir com o tráfego térreo.



Figura 4.7: Pórtico rolante.

Os elementos constituintes dos pórticos rolantes são os mesmos das pontes rolantes, referidos em 4.2.1, apenas com a diferença de que o caminho de rolamento é constituído por um sistema de carris fixos no solo ou por sistemas especializados, assentes sobre rodados.

### 4.3 Estrutura de suporte de pontes rolantes

As estruturas metálicas de suporte de pontes rolantes em edifícios industriais têm de garantir, com eficácia, o correto e contínuo funcionamento das pontes rolantes que operam nestes edifícios. A rotura destas estruturas, atendendo à magnitude das cargas envolvidas pode levar a perda de vidas humanas, danos no edifício e prejuízos financeiros significativos.

O dimensionamento destas estruturas deve requerer sempre a melhor abordagem prática, no sentido de evitar contratempos ou consequências indesejadas [10], seguindo o processo seguinte:

- i) Identificação de cargas atuantes sobre a estrutura de suporte;
- ii) Modelação da estrutura e obtenção da sua resposta;
- iii) Escolha da solução estrutural e dos pormenores construtivos mais adequados para garantir a segurança da estrutura.

As normas referentes ao dimensionamento específico deste tipo de estruturas apresentam-se em [36] e consideram as ações dinâmicas como cargas estáticas afetadas por coeficientes de amplificação dinâmicos,  $\varphi$ , como apresentado de forma mais profunda na secção 5 do presente trabalho.

As ações devidas a pontes rolantes são transmitidas à estrutura de suporte através dos rodados e os seus esforços são considerados em projeto como:

- Esforços decorrentes do normal funcionamento da ponte rolante;
- Esforços decorrentes de situações acidentais;
- Esforços decorrentes de má construção, falta de manutenção ou utilização imprópria da ponte rolante.

A estrutura principal de um edifício industrial, em traços gerais, é formada por pórticos que se multiplicam no desenvolvimento do edifício. A escolha da distância entre pórticos varia, não só por questões financeiras mas também por questões de especificidade de projeto.

As estruturas de suporte, geralmente em betão e/ou aço, são constituídas por carris, sistema de fixação dos carris e palmilha, viga de caminho de rolamento, pilares de suporte das vigas, contraventamentos dos pilares, amortecedores de final de curso e fundações [37]. A Figura 4.8 representa, a título de exemplo, um edifício industrial com diversos equipamentos mecânicos de movimentação de cargas.

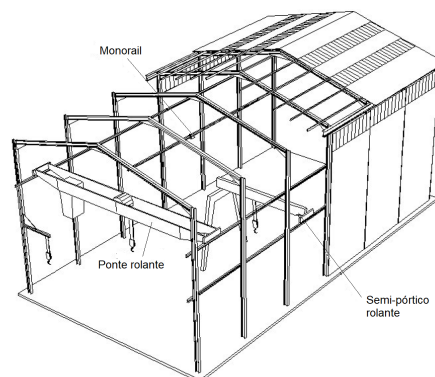


Figura 4.8: Exemplo de estrutura porticada com equipamentos de movimentação de cargas, adaptado de [11].

#### 4.3.1 Carris

Os carris são os primeiros elementos de contacto entre a ponte rolante e a estrutura de suporte. Estes elementos são extremamente esforçados devido às tensões transmitidas pelos rodados, gerando esforços de torção e ações horizontais, cuja influência é tanto maior quanto maior a altura do carril.

Para limitar os esforços de torção, o eixo vertical do carril não deve divergir do eixo vertical da alma da viga de suporte mais do que metade da espessura da alma da viga [37].

São utilizados diversos tipos de carril com base na classe da ponte rolante. A Figura 4.9 ilustra três tipos de carril, sendo a sua escolha baseada nas forças transmitidas e no diâmetro dos rodados.

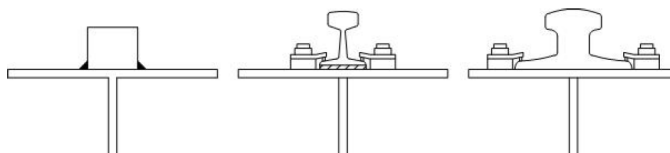


Figura 4.9: Tipos de carril, adaptado de [37].

As emendas dos carris devem ser cortadas com um ângulo de  $45^\circ$ , por forma a permitir dilatações, e a junta do carril deve estar desencontrada da junta das vigas

de caminho de rolamento [36], não devendo este ser soldado de forma a permitir rotações nos apoios das vigas (ver Figura 4.10). As tolerâncias construtivas para a montagem dos carris, são apresentadas nas normas [12].

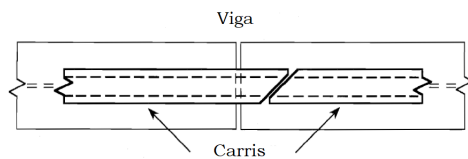


Figura 4.10: Pormenor da junta de carril de uma ponte rolante, adaptado de [36].

### 4.3.2 Sistema de fixação

O sistema de fixação dos carris à viga de suporte, representado na Figura 4.9, é fundamental para o correto funcionamento da ponte rolante. A fixação pode ser feita por meio de cordões de soldadura ou grampos, sendo esta última solução a mais aconselhável, por ser mais eficaz e de rápida execução. Como o carril é altamente solicitado, será o sistema de fixação a garantir o posicionamento alinhado do carril na viga de suporte.

Para pontes rolantes de menor magnitude adota-se geralmente a solução soldada, apesar de ser desfavorável a sua utilização pois podem ocorrer falhas na soldadura. Para pontes rolantes de classe elevada devem ser utilizados fixadores que permitam "movimentação" dos carris [4]. Deve ser dada especial atenção às juntas de expansão de descontinuidade entre carris pois, se o carril for contínuo, deve ser colocada uma junta na zona de final de curso.

### 4.3.3 Palmilhas

As palmilhas funcionam como amortecedores de cargas transmitidas à viga de suporte. Habitualmente são colocadas chapas metálicas na base do carril, de modo a reduzir as ações distribuídas de forma uniforme no banzo superior da viga. Estes elementos são dispendiosos mas ajudam a prolongar a vida útil do conjunto, podendo aliviar as tensões na viga, melhorar a distribuição de esforços, amortecer as vibrações e reduzir o ruído. Podem ainda contribuir para reduzir o coeficiente de atrito no suporte do carril na direção longitudinal.

### 4.3.4 Fins de curso

No final de uma viga de caminho de rolamento devem ser colocados batentes de fim de curso para no caso de impacto accidental, as forças serem absorvidas e encaminhadas para o sistema de contraventamento do edifício. Os amortecedores de fim de curso são colocados à mesma altura dos da ponte rolante.

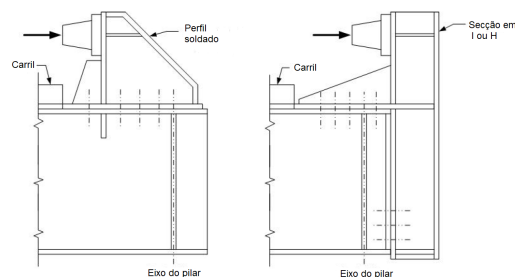


Figura 4.11: Exmplos de amortecedores de final de curso, adaptado de [37].

Os sistemas de final de curso são essenciais, pois existe a possibilidade de queda de uma ponte rolante, devida a erros de manobra. O dimensionamento dos amortecedores é apresentado em [35].

#### 4.3.5 Vigas de caminho de rolamento

No dimensionamento das vigas de caminho de rolamento devem ser garantidos os seguintes pontos:

- Eficiência estrutural;
- Rigidez no plano vertical, horizontal e de torsão;
- Facilidade de construção;
- Soldadura e acessibilidade de inspeção;
- Largura suficiente do banzo superior para montagem do sistema de fixação dos carris.

Os modelos de cálculo, adotados para vigas de caminho de rolamento, podem ser simplesmente apoiados, semi-contínuos ou contínuos, contudo vigas contínuas e semi-contínuas apresentam alguns problemas dada a restrição de graus de liberdade, gerando um aumento das tensões nos apoios [37].

O modelo de cálculo simplesmente apoiado apresenta-se como o mais aconselhável pois permite a rotação na extremidade da viga devida a forças verticais e forças horizontais (Figuras 4.12 a) e b)) por forma a evitar problemas de fadiga. Além disso, permite a dilatação das vigas sem acréscimo de esforços nos pilares do edifício.

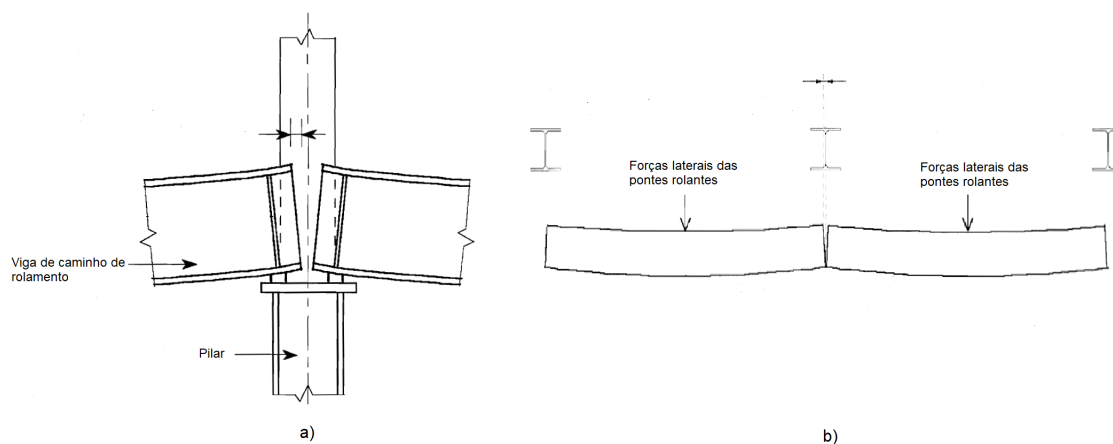


Figura 4.12: a) Rotação devida a forças verticais na extremidade da viga (vista em alçado), b) Rotação devida a forças horizontais na extremidade da viga (vista em planta), adaptado de [36].

#### 4.3.5.1 Secção transversal

A secção transversal dos perfis das vigas de caminho de rolamento pode ser constituída por perfis laminados a quente (para pontes rolantes leves) ou por secções transversais mais complexas em caixão ou com reforços transversais (para pontes rolantes pesadas).

A Figura 4.13 apresenta alguns exemplos de secções transversais utilizadas em vigas de caminho de rolamento.

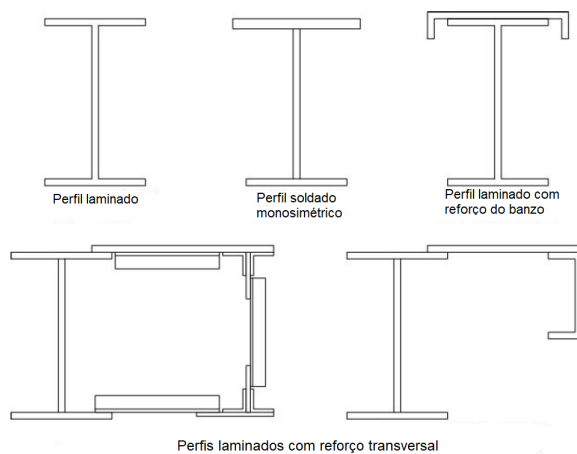


Figura 4.13: Exemplos de secções transversais adotadas em vigas de caminho de rolamento, adaptado de [37].

A utilização de perfis laminados a quente, em particular perfis IPE ou HEB, pode levar à necessidade de colocação de reforços no banzo superior, para melhor resistência às ações horizontais transversais [3]. Esta solução pode passar pela



utilização de um perfil UPN, como apresentado no terceiro caso na Figura 4.13, por forma a aumentar a inércia do conjunto.

#### 4.3.6 Pilares

São possíveis diversas tipologias estruturais de pilares em edifícios industriais com pontes rolantes.

A solução estrutural de transmissão de cargas verticais depende da classe de ponte rolante, expressa na Tabela 2.11 de [35], de acordo com as soluções construtivas mais habituais:

- i) Pórtico com consola, para pontes rolantes ligeiras – Figura 4.14 a);
- ii) Pórtico com pilar de secção variável, para pontes rolantes de peso médio – Figura 4.14 b);
- iii) Pórtico com pilar reticulado, para pontes rolantes de peso elevado ou com grandes vãos, com a finalidade de garantir boa ligação entre pilares – Figura 4.14 c).

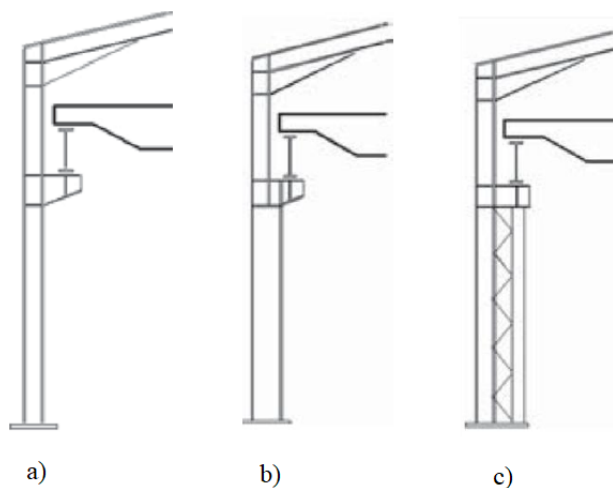


Figura 4.14: a) Pontes rolantes leves, b) Pontes rolantes médias, c) Pontes rolantes pesadas, adaptado de [20].

Na solução representada na Figura 4.14 a), o reforço transversal garante a robustez suficiente para resistência a cargas excêntricas.

É de salientar que, normalmente, os pilares não se encontram sujeitos a fenómenos de fadiga, visto que os seus elementos estão, principalmente, sujeitos a esforços de compressão.

#### 4.3.7 Contraventamento de pilares

As ações horizontais longitudinais induzidas por pontes rolantes, são absorvidas pela fachada do edifício industrial, sendo necessária a utilização de contraventamentos longitudinais para que os esforços sejam transmitidos à fundação (ver Figura 4.15). Os sistemas de transmissão de forças horizontais longitudinais asseguram também a resistência a outras ações horizontais, como vento e sismo.

A posição destes sistemas condiciona as deformações e os esforços na estrutura devido a variações de temperatura, sendo este fator condicionante na escolha do posicionamento do contraventamento [3].

Os esforços provocados pelas forças horizontais longitudinais são:

- Esforço axial;
- Momento fletor horizontal – se o contraventamento não estiver no plano do caminho de rolamento;
- Momento fletor vertical.

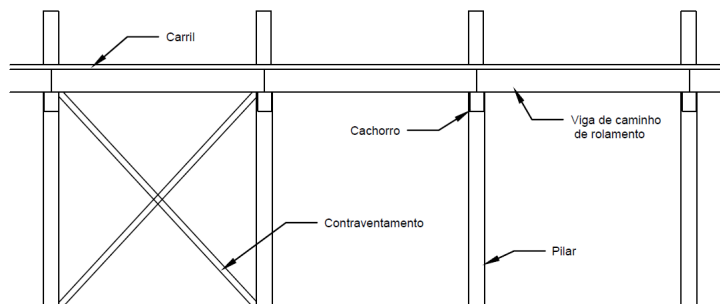


Figura 4.15: Vista em alçado de um pórtico com pontes rolantes.

## Capítulo 5

# Verificação de segurança à fadiga - Enquadramento regulamentar

### 5.1 Considerações gerais

Os Eurocódigos são um conjunto de normas técnicas para projeto e verificação de segurança de estruturas. Estas normas, tais com as normas F.E.M., apresentam métodos de cálculo e recomendações de dimensionamento baseados em coeficientes parciais, que contabilizam as incertezas desfavoráveis, e estados limites para os quais as estruturas devem ser verificadas.

Em projeto estrutural, devem ser considerados procedimentos que permitam determinar adequadamente os valores de cálculo das ações a que uma estrutura estará sujeita, assim como os seus efeitos combinados, para os requisitos do projeto em causa.

Em conformidade com o objetivo do presente trabalho, que engloba a verificação de segurança de estruturas de suporte de pontes rolantes à fadiga, as normas europeias para definição das ações em estruturas são:

- [22] para definir os princípios básicos para projeto de estruturas, estabelecendo os requisitos de segurança, de utilização e durabilidade de uma estrutura;
- [24] para definir as ações induzidas por pontes rolantes;
- [36] para definir o dimensionamento de estruturas de suporte de pontes rolantes;
- [27] para efetuar a verificação da segurança de estruturas à fadiga;
- [26] para definir a tenacidade e propriedades mecânicas do aço.

### 5.2 Combinações de ações

As combinações de ações são efetuadas em função da situação de projeto. De um modo geral, as ações podem ser consideradas como:

- Permanentes: situações correntes de serviço;
- Transitórias: situações temporárias;
- Acidentais: situações excepcionais;
- Sísmicas: solicitações de origem sísmica.

As situações de projeto estão associadas a estados limites, isto é, ao estado físico da estrutura devido ao tipo de solicitação. Os estados limites são classificados como Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Utilização (ELS).

No presente trabalho serão apenas utilizadas as combinações de ações de projeto para ações cíclicas e para rotura frágil devido à temperatura.

Para determinar os esforços numa estrutura sujeita a ações cíclicas, de acordo com [23], deve ser considerada a seguinte combinação de ações:

- Combinação de ações de projeto para ações cíclicas.

$$E_d = E\{\{G_{k,j}; P; \psi_{1,1}Q_{k,1}; \psi_{2,i}Q_{k,i}\}; Q_{fat}\} j \geq 1; i \geq 1 \quad (5.1)$$

ou, de forma mais explícita:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1}Q_{k,1} + \sum_{i > i} \psi_{2,i}Q_{k,i} + Q_{fat} \quad (5.2)$$

Em que:

$Q_{fat}$  é a ação de fadiga considerada.

Para determinar os esforços numa estrutura devido à rotura frágil, de acordo com [26] deve ser considerada a seguinte combinação de ações:

- Combinação de ações de projeto para ações térmicas.

$$E_d = E\{A[T_{Ed}] + \sum G_K + \psi_1 Q_{K1} + \sum \psi_{2,i} Q_{Ki}\} \quad (5.3)$$

Em que:

$T_{Ed}$  é a temperatura de referência;

$\psi_1 = 0.9$ ;

$\psi_2 = 0.8$ .

### 5.2.1 Coeficiente $\psi$ para ações de serviço de pontes rolantes

Os valores característicos das ações variáveis associadas ao funcionamento de uma ponte rolante são determinados por meio de coeficientes de combinação  $\psi_i$ , por forma a se conhecerem os valores de cálculo destas ações, considerando o efeito combinado das diferentes ações variáveis.

Definem-se os seguintes tipos de coeficientes  $\psi_i$ :

- $\psi_0$  - para determinação do valor de combinação de uma ação variável;
- $\psi_1$  - para determinação do valor frequente de uma ação variável;
- $\psi_2$  - para determinação do valor quase-permanente de uma ação variável.

Para ações decorrentes do funcionamento de uma ponte rolante, os valores adotados para  $\psi_i$  são os apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Coeficientes  $\psi_i$  para ações numa ponte rolante, adaptado de [35]

Coeficiente	Valor
$\psi_0$	1
$\psi_1$	0,9
$\psi_2$	Razão entre as ações permanentes e o valor total das ações na ponte rolante

O coeficiente  $\psi_2$  determina-se da seguinte forma:

$$\psi_2 = \frac{G_1 + G_2}{G_1 + G_2 + Q_h + (2 \cdot H_L) + (2 \cdot H_{B,2})} \quad (5.4)$$

Em que  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $Q_h$ ,  $H_L$  e  $H_{B,2}$  têm o significado referido na Secção 5.4.

### 5.3 Classificação das ações

As estruturas encontram-se submetidas a um conjunto de ações que têm características e classificações diferentes, e a sua variação temporal, como indicado na Tabela 5.2, pode ser classificada como estática ou dinâmica, de acordo com a sua natureza [22].

Tabela 5.2: Tipos de ações

Tipo	Símbolo	Exemplo
Ações permanentes	G	Peso próprio
Ações variáveis	Q	Ações de serviço de pontes rolantes
Ações acidentais	A	Impacto, Temperatura

#### 5.3.1 Ações dinâmicas

Estruturas metálicas de suporte de pontes rolantes são consideradas estruturas sujeitas a ações dinâmicas pois na maioria dos casos, para além de estarem submetidas a cargas estáticas (peso próprio e equipamentos fixos), estão também submetidas a cargas dinâmicas devidas a movimentação de cargas.

Os efeitos dinâmicos são quantificados nas ações verticais e horizontais, associados a movimentos de translação, aceleração e balanceamento de cargas.

O valor de cálculo,  $F_d$ , de uma ação dinâmica pode ser expresso através da seguinte expressão [22]:

$$F_{k,\varphi_i} = F_k \cdot \varphi_i \quad (5.5)$$

Em que :

$F_{k,\varphi_i}$  é o valor característico da ação dinâmica;

$F_k$  é o valor característico da componente estática da ação;

$\varphi_i$  é o fator dinâmico, que traduz a componente dinâmica da ação.

A utilização de um fator dinâmico,  $\varphi_i$ , permite simplificar a metodologia de dimensionamento de forma a evitar a necessidade de se efetuar uma análise dinâmica ao modelo estrutural.

## 5.4 Ações de uma ponte rolante

As ações de serviço em pontes rolantes são obtidas a partir de considerações estáticas em função do seu peso próprio e da utilização expectável no seu tempo de vida útil. A forma de obtenção das ações é dada em [35], mas em termos práticos é normalmente apresentada e verificada pelo fornecedor destes equipamentos, pelo que o objetivo principal do projetista é a análise estrutural das estruturas de suporte.

No presente trabalho, não serão abordadas as ações do vento, por essas serem apenas significativas em equipamentos localizados no exterior de edifícios.

A modelação das ações variáveis é efetuada em duas partes; em primeiro lugar, são calculados os fatores dinâmicos das ações e, posteriormente determinam-se os valores característicos das componentes estáticas das ações variáveis.

Uma estrutura metálica de suporte de uma ponte rolante encontra-se submetida às seguintes ações:

1. Ação vertical devida ao peso próprio do carro guincho, representada por  $Q_c$ ;
2. Ação vertical correspondente à carga de elevação, representada por  $Q_h$ ;
3. Ação vertical de teste, representada por  $Q_t$ ;
4. Ações horizontais devidas ao movimento da ponte, destacando-se três tipos;  $H_L, H_T$  e  $H_s$ :
  - $H_L$  corresponde às forças induzidas pelo movimento longitudinal da ponte ao longo da viga de caminho de rolamento;
  - $H_T$  corresponde às forças induzidas pelo movimento de translação do carro guincho ao longo da ponte, que provoca forças transversais na viga de caminho de rolamento;
  - $H_s$  corresponde às ações devidas à possível falta de guiamento da ponte sobre os carris, designadas por forças de lacete.

5. Ações horizontais acidentais, representadas por  $H_B$ . Estas ações subdividem-se em:

- $H_{B,1}$  quando correspondem à ação de embate da ponte rolante no amortecedor de proteção de fim de curso;
- $H_{B,2}$  quando correspondem à ação de embate do carro guincho no amortecedor de proteção de fim de curso.

A Tabela 5.3 apresenta os fatores dinâmicos a considerar para as situações de projeto contempladas em pontes rolantes.

Nesta Tabela, os valores indicados de 1 a 10 simbolizam a situação de projeto para cada caso. As situações de projeto na estrutura metálica do pórtico são as mesmas consideradas para a estrutura da ponte.

Os valores de cálculo das ações na estrutura do pórtico são determinados depois de serem conhecidos os esforços transmitidos pela ponte.

Tabela 5.3: Situações de projeto de uma ponte rolante e correspondentes fatores dinâmicos, adaptado de [35]

Ações		Símbolo	Situações de projeto									
			Estados Limites Últimos							Teste	Acidente	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Peso próprio	$Q_c$	$\varphi_1$	$\varphi_1$	1	$\varphi_4$	$\varphi$	$\varphi$	1	$\varphi$	1	1
2	Carga de elevação	$Q_h$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	-	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\eta$	-	1	1
3	Aceleração da ponte rolante	$H_L$	$\varphi_5$	$\varphi_5$	$\varphi_5$	$\varphi_5$	-	-	-	$\varphi_5$	-	-
4	Desalinhamento	$H_s$	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Aceleração ou frenagem do carro guincho	$H_L$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Ação do vento	$F_w$	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
7	Ação de teste	$Q_T$	-	-	-	-	-	-	$\varphi_6$	-	-	-
8	Ação de fim de curso do carro e da ponte	$H_B$	-	-	-	-	-	-	-	$\varphi_7$	-	-
9	Ação de fim de curso de elevação do cabo	$Q_c$	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-

#### 5.4.1 Fatores dinâmicos

Os fatores dinâmicos são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Fatores dinâmicos  $\varphi_i$ , adaptado de [35]

Fatores dinâmicos	Efeitos a considerar	Ações aplicadas a
$\varphi_1$	Excitação da estrutura da ponte rolante devido ao içamento de cargas	$Q_c$
$\varphi_2$ ou $\varphi_3$	Efeitos dinâmicos de transferência da carga do solo para a ponte rolante; Efeitos dinâmicos de libertação súbita de carga	$Q_h$
$\varphi_4$	Efeitos dinâmicos induzidos quando a ponte rolante circula nos carris	$Q_c$ e $Q_h$
$\varphi_5$	Efeitos dinâmicos devido às forças de arrasto	$H_L$ e $H_T$
$\varphi_6$	Efeitos dinâmicos considerando a movimentação de carga de teste	$Q_T$
$\varphi_7$	Efeitos dinâmicos de impacto	$H_B$

Para uma dada ação, os fatores dinâmicos determinam-se da seguinte forma:

- Fator  $\varphi_1$ :

$$0,9 < \varphi_1 < 1,1$$

O maior valor corresponde a vibrações elevadas e o menor valor corresponde à situação inversa.

- Fator  $\varphi_2$ :

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \nu_h \quad (5.6)$$

Em que:

$\varphi_{2,min}$  e  $\beta_2$  são fatores dependentes da classe de pontes rolantes;

$\nu_h$  é a velocidade constante de elevação da carga de serviço [m/s].

Os fatores  $\varphi_{2,min}$  e  $\beta_2$  são obtidos a partir da Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores de cálculo  $\varphi_{2,min}$  e  $\beta_2$ , adaptado de [35]

Classe de pontes rolantes em função da aplicação	$\beta_2$	$\varphi_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

- Fator  $\varphi_3$ :

$$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m}(1 + \beta_3) \quad (5.7)$$

Em que:

$\Delta m$  é a variação de carga durante o movimento de elevação;

$m$  é a carga máxima de serviço;

$\beta_3$  é um parâmetro definido em função do sistema de desprendimento (sistema de desprendimento rápido:  $\beta_3 = 1,0$ ; sistema de desprendimento lento:  $\beta_3 = 0,5$ )

- Fator  $\varphi_4$ :

É considerado igual a 1,0 se os carris forem instalados de acordo com as disposições especificadas em [36].

- Fator  $\varphi_5$ :

Considera o tipo de forças que originam o movimento horizontal da ponte rolante, e pode tomar os valores apresentados na Tabela 5.6.



Tabela 5.6: Valores de  $\varphi_5$ , adaptado de [35]

$\varphi_5$	Tipo de força
$\varphi_5 = 1,0$	Força centrífuga
$1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$	Sistemas com mudanças suaves
$1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$	Sistemas com mudanças bruscas
$\varphi_5 = 3,0$	Sistemas com folgas consideráveis

– Fator  $\varphi_6$ :

O seu valor depende se a ação de teste é considerada como uma ação variável ou como uma ação estática.

Considerando a carga de teste como ação dinâmica,

$$Q_t = 1,10 \cdot Q_h \quad (5.8)$$

Nesse caso, o fator dinâmico é:

$$\varphi_6 = 0,5(1 + \varphi_2) \quad (5.9)$$

Considerando a carga de teste como ação estática,

$$Q_t = 1,25 \cdot Q_h \quad (5.10)$$

Nesse caso, o fator dinâmico é:

$$\varphi_6 = 1,0 \quad (5.11)$$

– Fator  $\varphi_7$ :

É obtido a partir do conhecimento dos fatores de amortecimento,  $\xi_b$ , dos batentes de final de curso, sendo dado pela Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Valores de  $\varphi_7$ , adaptado de [35]

$\varphi_7$	Características do amortecedor
$\varphi_7 = 1,25$	$0,0 \leq \xi_b \leq 0,5$
$\varphi_7 = 1,25 + 0,7(\xi_b - 0,5)$	$0,5 \leq \xi_b \leq 1,0$

Em que:

$\xi_b$  é o fator de amortecimento do carro guincho e da ponte.

## 5.4.2 Ações de serviço

### 5.4.2.1 Forças verticais

As forças verticais totais,  $Q_r$ , transmitidas por uma ponte rolante à estrutura de suporte são representadas na Figura 5.1.

Consideram-se as seguintes forças verticais:

- Peso próprio do carro guincho,  $Q_c$ :

$$Q_c = F_c \quad (5.12)$$

- Carga de elevação,  $Q_h$ :

$$Q_h = F_h \quad (5.13)$$

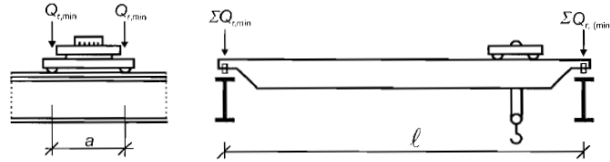


Figura 5.1: Ações verticais totais na ponte rolante, adaptado de [35]

#### 5.4.2.2 Forças horizontais

- Forças horizontais longitudinais,  $H_{L,i}$ :

Obtêm-se através da seguinte expressão:

$$H_{L,i} = \varphi_5 \cdot K \frac{1}{n_r} \quad (5.14)$$

Em que:

$K$  é a força horizontal que move o sistema;

$n_r$  é o número de carris do sistema;

$\varphi_5$  é o fator dinâmico correspondente a forças horizontais.

A força  $K$  é determinada em função do sistema de rodas, ilustrado na Figura 5.2.

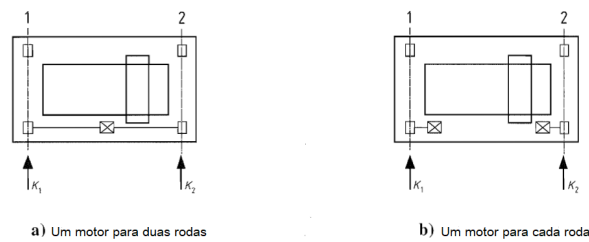


Figura 5.2: Forças horizontais  $K$ , adaptado de [35]

Desta forma tem-se:

$$K = K_1 + K_2 = \mu \Sigma Q_{r,min}^* \quad (5.15)$$

Em que:

$\Sigma Q_{r,min}^*$  é a carga total mínima do sistema;

$\mu$  é o coeficiente de atrito entre a roda e o carril;

Apenas é apresentado este sistema, pois a norma [35] refere que, para pontes rolantes modernas, este é o sistema mais utilizado. Os valores recomendados para  $\mu$  são: 0,2 para interação aço-aço e 0,5 para interação aço-borracha.

- Forças horizontais transversais,  $H_{T,i}$ :

Obtêm-se através das seguintes expressões:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \xi_2 \frac{M}{a} \quad (5.16)$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \xi_1 \frac{M}{a} \quad (5.17)$$

Em que:

$a$  é o espaçamento entre os rodados do carro guincho;

$M = K \cdot I_s$ .

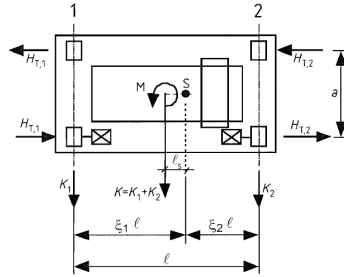


Figura 5.3: Forças horizontais transversais  $H_{T,1}$  e  $H_{T,2}$ , adaptado de [35]

- Forças de lacete,  $H_s$ :

A existência ou não de rodas flangeadas no carro é importante na quantificação deste tipo de ações.

Pontes rolantes mais recentes possuem rodas flangeadas com rodas motrizes independentes [35].

Estas forças têm origem no desvio que existe entre o centro de aplicação da força  $K$  e o centro de massa do carro guincho, como representado na Figura 5.4.

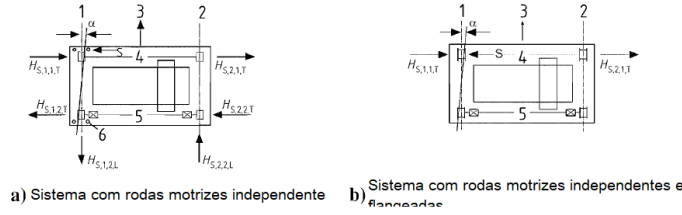


Figura 5.4: Forças  $H_s$  devidas a falta de guiamento, adaptado de [35]

As forças de desvio são obtidas através da seguinte expressão:

$$H_S = f \lambda_{S,i} \sum Q_r \quad (5.18)$$

Em que:

$f$  é um fator dado por:  $f = 0,3(1 - \exp(-250\alpha)) \leq 0,3$ ;

$\alpha$  é o ângulo de desvio;

$\lambda_{S,i,j,k}$  é um fator de força, especificado em [35];

$i$  é o número do carril correspondente;

– Forças acidentais,  $H_B$ :

As ações acidentais resultam dos efeitos de colisão dos elementos elevados pelas gruas com possíveis obstáculos e dos efeitos de colisão com os amortecedores de fim de curso da viga de caminho de rolamento.

Obtêm-se através da seguinte expressão:

$$H_{B,i} = \varphi_7 \nu_1 \sqrt{m_c S_B} \quad (5.19)$$

Em que:

$\nu_1$  é igual a 70% da velocidade de translação do sistema [m/s];

$m_c$  é a massa do sistema [kg];

$S_B$  é a constante de rigidez do amortecedor [N/m].

### 5.4.3 Ações de fadiga

As ações de fadiga são determinadas após a identificação dos valores característicos das ações de serviço. As cargas de fadiga  $Q_e$ , apresentadas em [35], obtêm-se considerando o parâmetro  $\lambda_i$  e o fator de amplificação dinâmico  $\varphi_{fat}$ , utilizando a seguinte expressão:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max,i} \quad (5.20)$$

Em que:

$Q_{max,i}$  é o valor máximo da carga vertical transmitida pelos rodados;

$\varphi_{fat}$  é o fator de amplificação dinâmica, dado por:

$$\varphi_{fat} = \max(\varphi_{fat,1}; \varphi_{fat,2}) \quad (5.21)$$

Em que:

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2} \quad e \quad \varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2} \quad (5.22)$$

Salienta-se que a abordagem de cálculo da expressão 5.20 é baseada no método de tensão equivalente.

#### 5.4.4 Ações de múltiplas pontes rolantes

Em situações de atuação simultânea de mais do que uma ponte rolante numa estrutura, consideram-se em termos de cálculo as suas ações como singulares [35]. O número máximo de pontes rolantes que podem atuar em simultâneo, de acordo com a sua posição mais desfavorável, é apresentado na Figura 5.5.

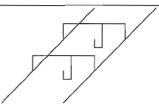
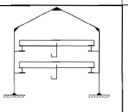
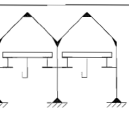
	Pontes em cada viga	Pontes em cada pórtico	Pontes em vários pórticos	
				
Ação vertical	3	4	4	2
Ação horizontal	2	2	2	2

Figura 5.5: Número máximo recomendável de pontes rolantes que podem atuar numa estrutura, adaptado de [35]

Para esta situação, a expressão 5.20 sofre uma ligeira alteração. O fator de dano equivalente toma a notação de  $\lambda_{dup}$  e, para as respetivas classes de carga  $S_i$ , os valores correspondentes sofrem as seguintes correções:

- Para 2 pontes rolantes: sabendo de antemão a classe de carregamento, opta-se por duas classes de carga inferiores à classe previamente utilizada;
- Para 3 ou mais pontes rolantes: sabendo de antemão a classe de carregamento, opta-se por três classes de carga inferiores à classe previamente utilizada.

Deste modo, obtém-se uma expressão para a carga vertical equivalente  $Q_{E,2,dup}$  devida a duas ou mais pontes rolantes atuarem em simultâneo.

$$Q_{E,2,dup} = \varphi_{fat} \cdot \lambda_{dup} \cdot Q_{max,dup} \quad (5.23)$$

Em que:

$Q_{max,dup}$  é o valor máximo da carga característica vertical dos rodados de todas as pontes rolantes a atuar em conjunto;

$\lambda_{dup}$  é o coeficiente parcial de dano equivalente dos efeitos de todas as pontes rolantes a atuar em conjunto.

## 5.5 Classificação dos equipamentos

As pontes rolantes classificam-se, quanto ao seu funcionamento, segundo dois critérios: classe de utilização e estado de carga.

Classe de utilização ( $U_i$ ): caracteriza a frequência de utilização do equipamento; depende do número estimado de ciclos de carga ( $C$ ) que o equipamento irá realizar na sua vida útil;

Estado de carga ( $Q_i$ ): caracteriza a severidade das cargas de serviço; depende da relação entre a carga  $Q_i$  que o equipamento irá elevar ao longo da sua vida útil e a carga para a qual a ponte é dimensionada.

A Tabela 5.8 apresenta os limites dos parâmetros a considerar adequados a cada projeto.

Tabela 5.8: Classes de ações de fadiga de pontes rolantes, adaptado de [35]

Classe do espectro de carga		$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
		kQ $\leq 0,03$ 13	$0,0313 < kQ \leq 0,0625$	$0,0625 < kQ \leq 0,125$	$0,125 < kQ \leq 0,25$	$0,25 < kQ \leq 0,5$	$0,5 < kQ \leq 1,0$
Classe do número total de ciclos							
$U_0$	$C \leq 1,6 \times 10^4$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_0$
$U_1$	$1,6 \times 10^4 < C \leq 3,15 \times 10^4$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_1$
$U_2$	$3,15 \times 10^4 < C \leq 6,30 \times 10^4$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_1$	$S_2$
$U_3$	$6,30 \times 10^4 < C \leq 1,25 \times 10^5$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$U_4$	$1,25 \times 10^5 < C \leq 2,50 \times 10^5$	$S_0$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$U_5$	$2,50 \times 10^5 < C \leq 5,00 \times 10^5$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
$U_6$	$5,00 \times 10^5 < C \leq 1,00 \times 10^6$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
$U_7$	$1,00 \times 10^6 < C \leq 2,00 \times 10^6$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$
$U_8$	$2,00 \times 10^6 < C \leq 4,00 \times 10^6$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$
$U_9$	$4,00 \times 10^6 < C \leq 8,00 \times 10^6$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$
kQ é o espectro de carga para todas as funções das pontes rolantes.							
C é o número total de ciclos durante o tempo de vida útil de uma ponte rolante.							

## 5.6 Verificação de segurança à fadiga

A verificação de segurança à fadiga, segundo [27], pode ser realizada através do método de acumulação de dano ou do método de tensão equivalente, como já foi referido no presente trabalho.

Para realizar essa verificação, é necessário identificar parâmetros relacionados com as especificidades do projeto em causa.

Para estruturas de suporte de pontes rolantes o tempo de vida útil, segundo [22], considera-se igual a 25 anos (ver Tabela 5.9). Posteriormente são definidos

os métodos de verificação adotados para verificação de segurança e a classe de consequência por forma a identificar o coeficiente parcial de resistência à fadiga,  $\gamma_{Mf}$ , a adotar na verificação.

Tabela 5.9: Tempo de vida útil de projetos, adaptado de [22]

Categoria de tempo de vida útil de projeto	Valor indicativo do tempo de vida útil do projeto (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias
2	10 a 25	Componentes estruturais substituíveis
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios
5	100	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas especiais

## 5.7 Classe de consequência

A classe de consequência considera o efeito do colapso ou mau funcionamento da estrutura, bem como a importância da estrutura ou elemento estrutural.

A classe a adotar depende da forma estrutural e das decisões tomadas no decorrer do projeto, e pode ser obtida através da Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Classes de consequência, adaptado de [22]

Classe de Consequências	Descrição	Exemplos de obras de engenharia civil
CC3	Consequência <b>elevada</b> em termos de perdas de vidas humanas; consequências económicas ou ambientais <b>muito importantes</b>	Bancadas, edifícios públicos com consequências de colapso elevadas
CC2	Consequência <b>média</b> em termos de perda de vidas humanas; consequências económicas, sociais <b>mediamente importantes</b>	Edifícios de habitação e de escritórios com consequências de colapso médias
CC1	Consequência <b>baixa</b> em termos de perda de vidas humanas; consequências económicas, sociais <b>pouco importantes</b>	Edifícios agrícolas normalmente não ocupados permanentemente por pessoas

No presente trabalho, foi considerada a classe de consequência **CC2**, visto que o caso de estudo é referente a uma nave industrial com movimentação de pessoas no seu interior durante um largo período de tempo.

### 5.7.1 Métodos de verificação

De acordo com [27], a verificação à fadiga dos elementos estruturais deve ser efetuada utilizando as seguintes estratégias:

- Método de tempo de vida garantido:

O método do tempo de vida garantido fornece uma fiabilidade aceitável no tempo de vida útil da estrutura, sem existir a necessidade da realização de inspeções periódicas ou manutenção dos pontos críticos de fadiga, devido a fraca acessibilidade aos pormenores críticos ou devido a imposições do dono

de obra.

Neste método, a fiabilidade inicial é elevada e decresce ao longo do tempo até atingir um valor mínimo no fim do tempo de vida útil, como se pode observar pela linha a traço interrompido na Figura 5.6.

– Método de dano controlado:

O método do dano controlado pressupõe que a estrutura terá um comportamento aceitável durante o tempo de vida útil em função do seu plano de manutenção, o qual tem como objetivo inspecionar os pormenores estruturais que possam sofrer fadiga e controlar a propagação de fendas.

Neste método, a fiabilidade é inicialmente inferior à correspondente ao tempo de vida garantido, mas com reajustes periódicos, como se pode observar pelas linhas a cheio na Figura 5.6.

A filosofia deste método pressupõe que uma estrutura deve ter um número suficientemente elevado de elementos redundantes de forma a que o colapso de um elemento isolado não provoque o colapso global.

A Figura 5.6 apresenta a evolução do índice de fiabilidade calculado pelos métodos de tempo de vida garantido e dano controlado ao longo do tempo de vida útil.

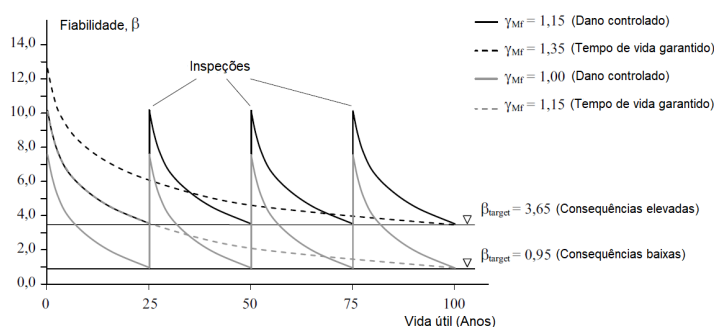


Figura 5.6: Fiabilidade à fadiga em função do método de verificação e da classe de consequência, adaptado de [19]

### 5.7.1.1 Coeficiente parcial de resistência à fadiga, $\gamma_{Mf}$

A escolha do coeficiente parcial de resistência à fadiga,  $\gamma_{Mf}$ , tem em consideração:

- O método de verificação da resistência à fadiga;
- A classe de consequência.

Assim, são tidas em conta as características da estrutura, bem como a fiabilidade da estrutura em serviço e as consequências de dano da estrutura em caso de rotura. Com base nestes parâmetros, é possível escolher através da Tabela 5.11 o coeficiente parcial de resistência à fadiga.



Tabela 5.11: Valores do coeficiente parcial de resistência à fadiga,  $\gamma_{Mf}$ , adaptado de [27]

Método de verificação	Consequências da rotura	
	Consequências pouco importantes	Consequências importantes
Dano controlado	1,00	1,15
Tempo de vida garantido	1,15	1,35

## 5.8 Verificação da resistência à fadiga

A norma [27] utiliza o conceito de tensão nominal como forma de cálculo para a verificação à fadiga. Tal significa que a variação das tensões nominais resultantes das ações de fadiga,  $\Delta\sigma_{Ed}$  ou  $\Delta\tau_{Ed}$ , é comparada com o valor de resistência à fadiga,  $\Delta\sigma_{Rd}$  ou  $\Delta\tau_{Rd}$ .

Os intervalos de tensão nominal não deverão exceder os seguintes limites:

$\Delta\sigma \leq 1,5f_y$  para tensões normais;

$\Delta\tau \leq 1,5f_y/\sqrt{3}$  para tensões de corte.

Visto que no exemplo a analisar será utilizado um aço S355 com  $f_y = 355N/mm^2$ , os correspondentes limites são:

$$\Delta\sigma \leq 532,5N/mm^2$$

$$\Delta\tau \leq 307,5N/mm^2$$

No presente trabalho são abordados dois formatos de verificação, baseados nos métodos anteriormente descritos na Secção 2.4.

- Verificação pelo método de acumulação de danos;
- Verificação pelo método do fator de dano equivalente.

### 5.8.1 Verificação pelo método de acumulação de danos

Se as cargas de serviço forem conhecidas e bem definidas, é possível efetuar a verificação à fadiga através deste método, apresentado em [27], utilizando a seguinte expressão:

$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq D_{max} \quad (5.24)$$

Em que:

$n_{Ei}$  é o número de ciclos associados ao histórico de tensões;

$N_{Ri}$  é a resistência (em ciclos) obtida para a variação de tensão,  $\Delta\sigma_{Ed,i}$ , afetada pelos coeficientes parciais de segurança;

$D_{max}$  é o valor máximo da acumulação de danos.

O valor indicado em [27] como limite de dano acumulado é  $D_{max} = 1$ , sendo este o valor limite que verifica a segurança da estrutura.

Nesta verificação, as tensões abaixo do limite de truncatura ( $\Delta\sigma_L$ ) são geralmente desprezadas.

No caso da verificação de segurança de mais do que uma ponte rolante, é tido em conta o efeito combinado do dano individual de cada ponte rolante com a simultaneidade das diversas ações, através da seguinte equação:

$$\sum_i D_i + D_{dup} \leq 1.0 \quad (5.25)$$

Em que:

$D_i$  é o dano devido a uma ponte rolante;

$D_{dup}$  é o dano adicional devido à combinação das diversas pontes rolantes atuando em simultâneo.

Os danos acumulados  $D_i$  e  $D_{dup}$  são calculados sob o efeito do coeficiente parcial de segurança à fadiga e combinam o efeito das tensões normais e de corte.

### 5.8.2 Verificação pelo método do fator de dano equivalente

A verificação da segurança à fadiga pelo método do fator de dano equivalente é um procedimento simples e standardizado.

O valor de dimensionamento do intervalo de tensões, para  $2 \times 10^6$  ciclos é representado por  $\Delta\sigma_{E,2}$ . Este valor é comparado com a correspondente categoria de pormenor em estudo, através da seguinte relação:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \quad (5.26)$$

Em que:

$\gamma_{Ff}$  é o coeficiente parcial de efeito das ações, que de acordo com o EC3, toma o valor unitário;

$\gamma_{Mf}$  é o coeficiente parcial de segurança à fadiga;

$\Delta\sigma_C$  é a tensão limite do pormenor;

$\Delta\sigma_{E,2}$  é a amplitude de tensões atuantes, obtida pela expressão 5.20 e afetada pelo fator de dano equivalente  $\lambda_i$ .

## Capítulo 6

### Caso de estudo

No presente capítulo serão postos em prática os temas abordados ao longo deste trabalho, através da análise de um caso de estudo, fornecido pela empresa Civiconcebe.

O trabalho foca-se na verificação de segurança à fadiga de pormenores estruturais, com maior suscetibilidade de iniciação de fendas por fadiga, resultante das ações de equipamentos mecânicos, nomeadamente pontes rolantes, instalados na estrutura principal de um edifício. Assim, o caso em questão consiste num edifício industrial constituído por pórticos com pé direito útil de 14 m, e vãos típicos de 8,5 m, em que os alinhamentos em planta correspondem a pontes rolantes assentes em vigas de rolamento que, por sua vez, se apoiam em pilares com cachorros metálicos. A estrutura é representada nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3.

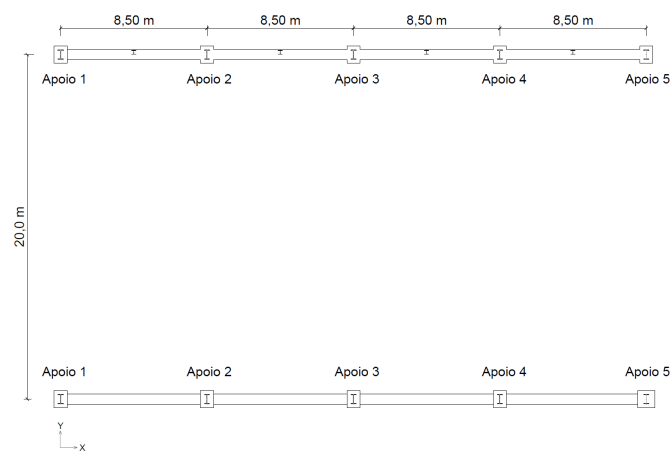


Figura 6.1: Planta do edifício.

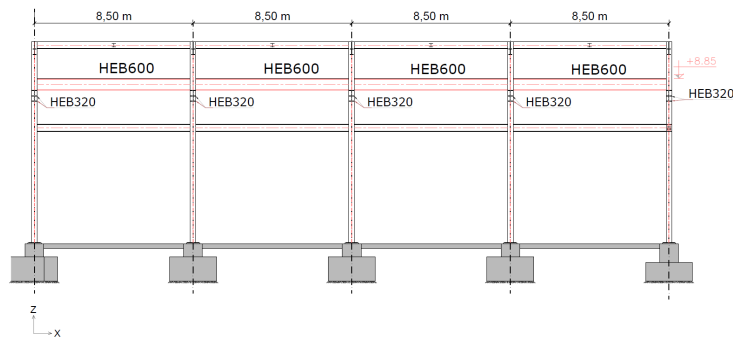


Figura 6.2: Alçado do edifício, vista no plano XZ.

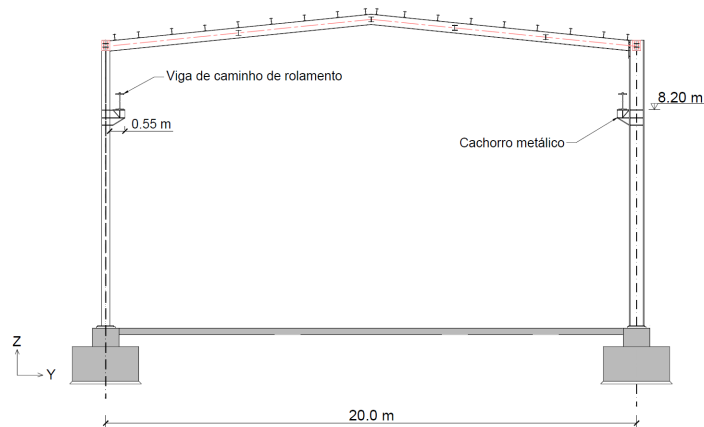


Figura 6.3: Alçado do edifício, vista no plano YZ.

Na Figura 6.4, representa-se esquematicamente a ponte rolante considerada neste caso prático, a qual é uma ponte rolante biviga de 16 toneladas da marca *DEMAG*. A ponte vence um vão de 20 m, os apoios da viga de caminho de rolamento distam entre si 8,5 m e a distância entre rodados da ponte é de 3,15 m. As mesmas características aplicam-se quando são consideradas duas pontes rolantes em funcionamento simultâneo.

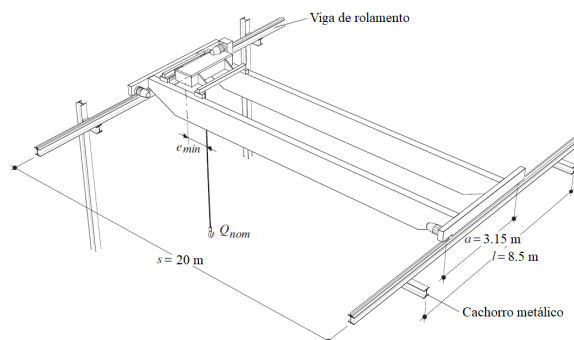


Figura 6.4: Exemplo de ponte rolante, adaptado de [19].

## 6.1 Caracterização do modelo de cálculo

A análise estrutural foi realizada através de um modelo tridimensional, utilizando o programa de cálculo de elementos finitos *SAP2000* [6].

O tipo de aço considerado foi o *S355*. Como secção transversal das vigas de caminho de rolamento foi considerado um perfil laminado *HEB600* e para os cachorros metálicos foi considerado um perfil *HEB320*.

No modelo foram introduzidos os parâmetros de carga correspondentes aos valores característicos da ponte rolante afetados pelos respetivos coeficientes de amplificação dinâmica, considerando a combinação de ações de fadiga e ações térmicas. É admitido uma temperatura de projeto de  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Foram contempladas duas situações de análise: inicialmente considerou-se apenas o funcionamento de uma ponte rolante de ida e de volta ao longo do caminho de rolamento; posteriormente, adicionou-se a carga correspondente à adição de uma ponte rolante nas mesmas condições, funcionando lado a lado.

A representação do modelo tridimensional elaborado é apresentada nas Figuras 6.5 a 6.8.

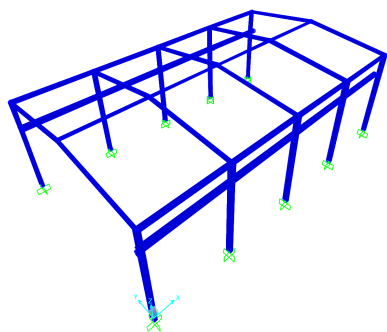


Figura 6.5: Vista tridimensional do modelo da estrutura do edifício.

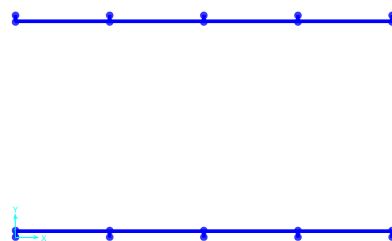


Figura 6.6: Vista em planta do modelo.

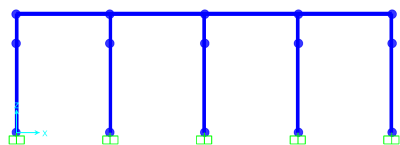


Figura 6.7: Vista do modelo: Alçado XZ.

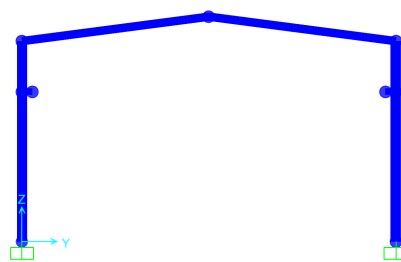


Figura 6.8: Vista do modelo: Alçado YZ.

No modelo de elementos finitos foram considerados casos de carga correspondentes ao posicionamento das cargas em diversas posições no caminho de rolamento (Tabelas 6.1 e 6.2), por forma a se obter um conjunto de resultados suficientes para aplicação do método de acumulação de dano. O caminho de rolamento foi dividido

com um espaçamento de 0,617 m (no caso de uma ponte rolante) e 0,6925 m (no caso de duas pontes rolantes). A razão pela qual são adotados os espaçamentos referidos deve-se ao posicionamento dos rodados ao longo do comprimento total de 34 m, isto é, cada ponte rolante é constituída por um par de rodados com um afastamento entre si de 3,15 m e por forma a que o posicionamento da ponte na viga de caminho de rolamento esteja bem definido (para obtenção dos históricos de carga, necessários para o método de acumulação de danos).

Tabela 6.1: Casos de carga para uma ponte rolante.

Caso de carga	Instante	Posição da roda 1	Posição da roda 2
CC1	0, 0s	0, 0m	3, 15m
CC2	1, 02s	0, 617m	3, 767m
CC3	2, 04s	1, 234m	4, 384m
CC4	3, 06s	1, 851m	5, 001m
CC5	4, 08s	2, 468m	5, 618m
CC6	5, 10s	3, 085m	6, 235m
CC7	6, 12m	3, 702m	6, 852m
CC8	7, 14s	4, 319m	7, 469m
CC9	8, 16	4, 936m	8, 086m
CC10	9, 18s	5, 553m	8, 703m
CC11	10, 20	6, 170m	9, 320m
CC12	11, 22s	6, 787m	9, 937m
CC13	12, 24s	7, 404m	10, 554m
CC14	13, 26s	8, 021m	11, 171m
CC15	14, 28s	8, 638m	11, 788m
CC16	15, 30s	9, 255m	12, 405m
CC17	16, 32s	9, 872m	13, 022m
CC18	17, 34s	10, 489m	13, 639m
CC19	18, 36s	11, 106m	14, 256m
CC20	19, 38s	11, 723m	14, 873m
CC21	20, 40s	12, 340m	15, 490m
CC22	21, 42s	12, 957m	16, 107m
CC23	22, 44s	13, 574m	16, 724m
CC24	23, 46s	14, 191m	17, 341m
CC25	24, 48s	14, 808m	17, 958m
CC26	25, 50s	15, 425m	18, 575m
CC27	26, 52s	16, 042m	19, 192m
CC28	27, 54s	16, 659m	19, 809m
CC29	28, 56s	17, 276m	20, 426m
CC30	29, 58s	17, 893m	21, 043m
CC31	30, 60s	18, 510m	21, 660m
CC32	31, 62s	19, 127m	22, 277m
CC33	32, 64s	19, 744m	22, 894m
CC34	33, 66s	20, 361m	23, 511m
CC35	34, 68s	20, 978m	24, 128m
CC36	35, 70s	21, 595m	24, 745m
CC37	36, 72s	22, 212m	25, 362m
CC38	37, 74s	22, 829m	25, 979m
CC39	38, 76s	23, 446m	26, 596m
CC40	39, 78s	24, 063m	27, 213m
CC41	40, 80s	24, 680m	27, 830m
CC42	41, 82s	25, 297m	28, 447m
CC43	42, 84s	25, 914m	29, 064m
CC44	43, 86s	26, 531m	29, 681m
CC45	44, 88s	27, 148m	30, 298m
CC46	45, 90s	27, 765m	30, 915m
CC47	46, 92s	28, 382m	31, 532m
CC48	47, 94s	28, 999m	32, 149m
CC49	48, 96s	29, 616m	32, 766m
CC50	49, 98s	30, 233m	33, 383m
CC51	51, 00s	30, 850m	34, 000m

Tabela 6.2: Casos de carga para duas pontes rolantes.

Caso de carga	Instante	Posição da roda 1	Posição da roda 2 e 3	Posição da roda 4
CC1	0,00s	0,0000m	3,1500m	6,3000m
CC2	1,15s	0,6925m	3,8425m	6,9925m
CC3	2,31s	1,3850m	4,5350m	7,6850m
CC4	3,46s	2,0775m	5,2275m	8,3775m
CC5	4,61s	2,7700m	5,9200m	9,0700m
CC6	5,77s	3,4625m	6,6125m	9,7625m
CC7	6,92s	4,1550m	7,3050m	10,4550m
CC8	8,07s	4,8475m	7,9975m	11,1475m
CC9	9,22s	5,5400m	8,6900m	11,8400m
CC10	10,38s	6,2325m	9,3825m	12,5325m
CC11	11,53s	6,9250m	10,0750m	13,2250m
CC12	12,68s	7,6175m	10,7675m	13,9175m
CC13	13,84s	8,3100m	11,4600m	14,6100m
CC14	14,99s	9,0025m	12,1525m	15,3025m
CC15	16,14s	9,6950m	12,8450m	15,9950m
CC16	17,30s	10,3875m	13,5375m	16,6875m
CC17	18,45s	11,0800m	14,2300m	17,3800m
CC18	19,60s	11,7725m	14,9225m	18,0725m
CC19	20,75s	12,4650m	15,6150m	18,7650m
CC20	21,91s	13,1575m	16,3075m	19,4575m
CC21	23,06s	13,8500m	17,0000m	20,1500m
CC22	24,21s	14,5425m	17,6925m	20,8425m
CC23	25,37s	15,2350m	18,3850m	21,5350m
CC24	26,52s	15,9275m	19,0775m	22,2275m
CC25	27,67s	16,6200m	19,7700m	22,9200m
CC26	28,83s	17,3125m	20,4625m	23,6125m
CC27	29,98s	18,0050m	21,1550m	24,3050m
CC28	31,13s	18,6975m	21,8475m	24,9975m
CC29	32,28s	19,3900m	22,5400m	25,6900m
CC30	33,44s	20,0825m	23,2325m	26,3825m
CC31	34,59s	20,7750m	23,9250m	27,0750m
CC32	35,74s	21,4675m	24,6175m	27,7675m
CC33	36,90s	22,1600m	25,3100m	28,4600m
CC34	38,05s	22,8525m	26,0025m	29,1525m
CC35	39,20s	23,5450m	26,6950m	29,8450m
CC36	40,36s	24,2375m	27,3875m	30,5375m
CC37	41,51s	24,9300m	28,0800m	31,2300m
CC38	42,66s	25,6225m	28,7725m	31,9225m
CC39	43,81s	26,3150m	29,4650m	32,6150m
CC40	44,97s	27,0075m	30,1575m	33,3075m
CC41	46,12s	27,7000m	30,8500m	34,0000m

## 6.2 Caracterização de ações

Os dados necessários para caracterização da classe de funcionamento e das ações no modelo foram fornecidas pelo fabricante, correspondendo a pontes rolantes com capacidade de carga de 16 toneladas. As ações transmitidas ao pórtico são apenas consideradas em duas direções (longitudinal, transversal horizontal e transversal vertical relativamente ao eixo da viga).

Após obtenção das ações, calculam-se as tensões nos pontos selecionados para análise.

Os valores de cálculo, bem como os correspondentes coeficientes de amplificação dinâmica são apresentados na presente secção.

As forças associadas ao funcionamento da ponte rolante são apresentadas na Figura 6.9.

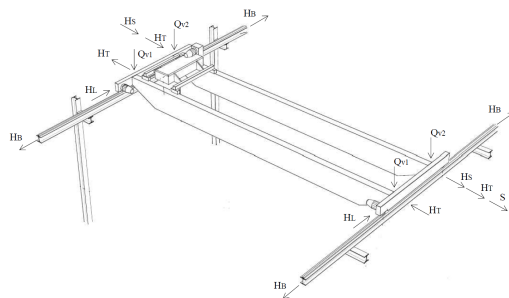


Figura 6.9: Esquema de forças resultantes da ponte rolante, adaptado de [19].

Os valores característicos das massas das diferentes partes de uma ponte rolante são apresentados na Tabela 6.3, sendo depois feita a sua conversão para forças verticais. Na mesma Tabela, apresentam-se ainda as reações nas rodas.

Tabela 6.3: Pesos das partes relevantes das ponte rolante e reações máximas por roda.

Carro	2004kg	Roda 1	$Q_c$	3888kg
Viga da ponte rolante	10114kg		$Q_h$	8082kg
Mecanismo de translação	1414kg	Roda 2	$Q_c$	3762kg
Partes elétricas	152kg		$Q_h$	7199kg
Grua	13684kg			

As forças horizontais resultantes fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Forças resultantes do movimento da ponte rolante.

HS11/HS12	0kN/28,25kN
HS21/HS22	0kN/7,98kN
HL	3,15kN
HT	10,1kN
S	36,23kN
HB	25,85kN

Os valores das velocidades de funcionamento do equipamento apresentam-se na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Velocidade dos equipamentos.

Velocidade de elevação	0,01m/s
Velocidade de translação do carro	0,4m/s
Velocidade de translação da grua	0,6m/s

Os valores de coeficientes de amplificação dinâmica indicados pelo fornecedor são apresentados na Tabela 6.6.



Tabela 6.6: Coeficientes dinâmicos fornecidos pela *DEMAG*.

$\varphi_1$	1,1
$\varphi_2$	1,11
$\varphi_3$	1,0
$\varphi_4$	1,0
$\varphi_5$	1,8
$\varphi_6$	1,0 ou 1,05
$\varphi_7$	1,27

Com esta informação, é possível determinar o coeficiente dinâmico de dano equivalente, dado pela expressão 5.21, correspondendo a  $\varphi_{fat} = 1,055$ .

### 6.3 Secções transversais

As características dos perfis laminados adotados no presente trabalho foram retirados de catálogos do fornecedor *Arcelor*, sendo os respetivos valores apresentados nas tabelas seguintes:

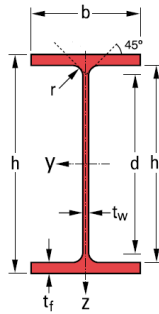


Figura 6.10: Secção transversal tipo, adaptado de [2].

- Viga de caminho de rolamento: **HEB 600**

Tabela 6.7: Propriedades do perfil HEB 600, adaptado de [2].

G	A	h	b	$t_w$	$t_f$	d	$I_y$	$I_z$
kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>
212	270	600	300	15.5	30	486	171 000	13530

- Cachorro metálico: **HEB 320**

Tabela 6.8: Propriedades do perfil HEB 320, adaptado de [2].

G	A	h	b	$t_w$	$t_f$	d	$I_y$	$I_z$
kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>
320	161.3	320	300	11.5	20.5	225	30820	9239

### 6.4 Classe de funcionamento das pontes rolantes

A caracterização da classe de funcionamento de uma ponte rolante é determinante para a contabilização dos ciclos previstos durante o tempo de vida útil.

Através dos dados da velocidade de translação anteriormente apresentados e do tempo de funcionamento previsto durante o tempo de vida útil, obtém-se o número de ciclos totais efetuados pelo equipamento. Tem-se então que:

Funcionamento de uma ponte rolante:

Tabela 6.9: Ciclos de carga para uma ponte rolante.

Um ciclo	103,02s
Nº de Ciclos/Hora	35 ciclos
Hroas de funcionamento/Dia	16 horas
Dias/Ano	365 dias
Tempo de vida útil	25 anos
Nº de ciclos	5110000 ciclos

Para o número de ciclos obtido, através da Tabela 5.8 tem-se:

- Número total de ciclos: **U9**
- Espectro de carga: **Q5**

Daí resulta uma classe de funcionamento de pontes rolantes **S9**.

Os fatores de dano equivalente,  $\lambda_i$ , correspondentes são:

$$\lambda_{(\sigma_{normal})} = 1,587$$

$$\lambda_{(\sigma_{corte})} = 1,32$$

Duas pontes rolantes em funcionamento:

Tabela 6.10: Ciclos de carga para duas pontes rolantes.

Um ciclo	93,39s
Nº de Ciclos/Hora	39 ciclos
Hroas de funcionamento/Dia	16 horas
Dias/Ano	365 dias
Tempo de vida útil	25 anos
Nº de ciclos	5694000 ciclos

Como referido em 5.4.4 relativamente à escolha do fator de dano equivalente, para duas pontes rolantes a classe de funcionamento passa a ser **S7**, resultando em:

$$\lambda_{(\sigma_{normal})} = 1,00$$

$$\lambda_{(\sigma_{corte})} = 1,00$$

## 6.5 Modelos de cálculo

De forma a quantificar os esforços internos nos pormenores das ligações da estrutura, elaboraram-se modelos de cálculo com o objetivo de converter as forças obtidas no modelo tridimensional em tensões. Serão abordadas ligações aparafusadas e

soldadas.

Inicialmente, descrevem-se de forma resumida as abordagens seguidas para cálculo das ligações aparafusadas e soldadas, aplicando-se posteriormente os respectivos modelos de cálculo a cada pormenor.

### Ligações aparafusadas

Em ligações com parafusos sujeitas a impactos, vibrações significativas ou ações de fadiga, não devem ser utilizados parafusos de classe corrente, sendo aconselhável a utilização de parafusos pré-esforçados (Classe 8.8 e 10.9). Neste caso, consideraram-se parafusos *M27* de classe 8.8.

Os parafusos pré-esforçados têm o objetivo de evitar que a união entre elementos se separe por aplicação de uma força exterior,  $P$ , evitando o deslocamento relativo entre as peças através de uma força de atrito suficiente para se opor a uma força transversal,  $P_s$ , e minimizando assim o efeito de fadiga no parafuso [25].

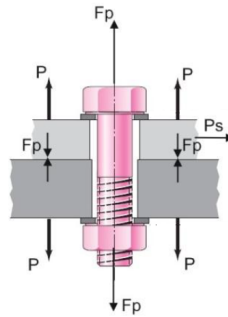


Figura 6.11: Parafuso pré-esforçado, adaptado de [32]

A força de pré-esforço,  $F_{p,C}$ , é determinada através da seguinte expressão [25]:

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s \quad (6.1)$$

Sendo os parafusos da classe 8.8, a tensão inicial no parafuso introduzida pelo pré-esforço é  $\sigma_{p,C} = 0,7 \times 800 = 560 \text{ N/mm}^2$ .

Na verificação de parafusos pré-esforçados à fadiga, após conhecida a tensão inicial instalada, analisam-se as tensões atuantes.

Note-se que apenas são contabilizados os valores em que as tensões atuantes são superiores às tensões de pré-esforço, pois é apenas acima desse limite que o parafuso começa a “trabalhar” à tração.

### Ligações soldadas

Em ligações soldadas, o cálculo das tensões é efetuado segundo as direções dos esforços atuantes, projetando a secção efetiva da garganta da soldadura em dois planos, como se observa na Figura 6.12. Nos casos analisados, foram adotados cordões de soldadura de espessura  $a = 6 \text{ mm}$ .

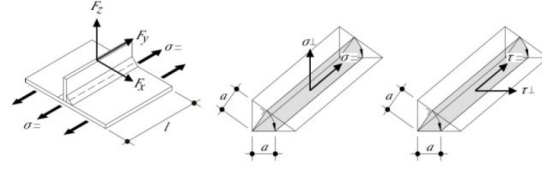


Figura 6.12: Tensões atuantes em soldaduras, adaptado de [19]

Em cada pormenor as abordagens de cálculo variam ligeiramente, dependendo do tipo de análise de rotura na soldadura.

Os tipos de rotura possível numa soldadura são apresentados na Figura 6.13, em que o caso A corresponde a rotura a partir da raiz e o caso B corresponde a rotura a partir do pé (ou base) da soldadura.

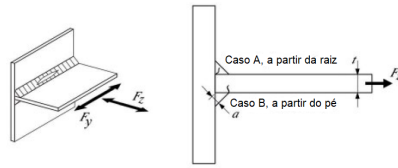


Figura 6.13: Situações de rotura numa soldadura, adaptado de [19]

Para cada caso, as formas de cálculo de tensões são:

– Caso A:

$$\sigma_w = \sqrt{\left(\frac{F_z}{2a_{eff} \cdot l}\right)^2 + \sigma_{\parallel}^2} \quad (6.2)$$

$$\tau_w = \tau_{\parallel} = \frac{F_y}{2a_{eff} \cdot l} \quad (6.3)$$

– Caso B:

$$\sigma = \frac{F_z}{t \cdot l} \quad (6.4)$$

Em que:

$F_y$  é a força tangencial no elemento solicitado;

$F_z$  é a força axial no elemento solicitado;

$l$  é o comprimento do cordão de soldadura;

$w = 2a$

$a$  é a garganta da soldadura.

### 6.5.1 Pormenores 1 e 2

As forças de tração,  $F_T$ , obtêm-se a partir dos momentos  $M_x$  obtidos no modelo tridimensional, dividindo-os pelo braço  $b$ . O modelo é apresentado na Figura 6.14.

$$F_T = \frac{M}{b} \quad (6.5)$$

As tensões instaladas no pé da soldadura são obtidas utilizando a expressão 6.4 e as tensões instaladas na raiz da soldadura são obtidas utilizando a expressão 6.2.

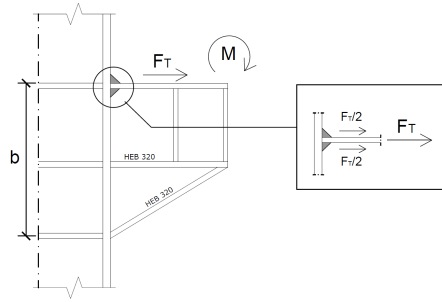


Figura 6.14: Modelo para cálculo de tensões nos pormenores 1 e 2

### 6.5.2 Pormenores 3 e 4

Os esforços relevantes nesta situação são as forças de corte, representadas na Figura 6.15. Com base nas forças atuantes  $V$  na ligação, obtêm-se as tensões tangenciais no cordão de soldadura, tanto no pé como na raiz, pela expressão 6.3.

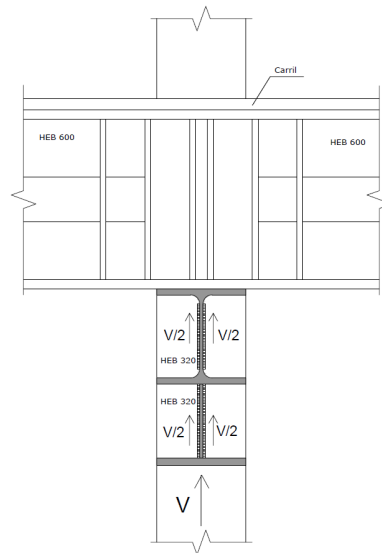


Figura 6.15: Modelo para cálculo de tensões nos pormenores 3 e 4

### 6.5.3 Pormenor 5

Neste pormenor, apresentado na Figura 6.16, as tensões obtêm-se a partir dos momentos  $M_y$  resultantes do modelo, através da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{M_y \cdot x_2}{I_y} \quad (6.6)$$

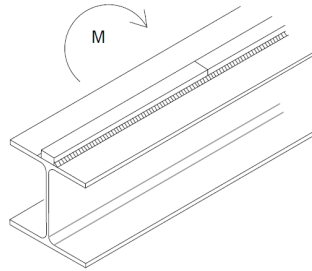


Figura 6.16: Modelo para cálculo de tensões no pormenor 5

### 6.5.4 Pormenor 6

Para se obter as tensões instaladas, consideram-se os quatro parafusos à tração e admite-se o centro de rotação na extremidade do banzo inferior. Consideram-se as ações no alçado YZ (Figura 6.17, a)) e no alçado XZ (Figura 6.17, b)). Assim, tem-se:

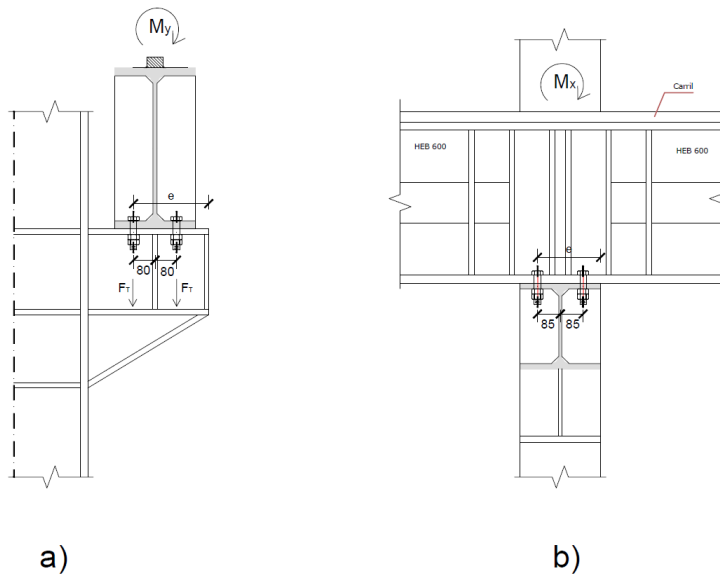


Figura 6.17: Modelo para cálculo de tensões no pormenor 6

– Alçado YZ:

$$2 \cdot F_T \cdot e + 2 \cdot F_T \cdot (e - 160) = M_y \quad (6.7)$$

– Alçado XZ:

$$2 \cdot F_T \cdot e + 2 \cdot F_T \cdot (e - 170) = M_x \quad (6.8)$$

A tensão de tração em cada parafuso é dada pela expressão:

$$\sigma = \frac{F_T}{A_s} \quad (6.9)$$

### 6.5.5 Pormenor 7

As tensões nos cordões de soldadura entre o carril e o banzo superior da viga (Figura 6.18), são obtidos pela expressão 6.3.

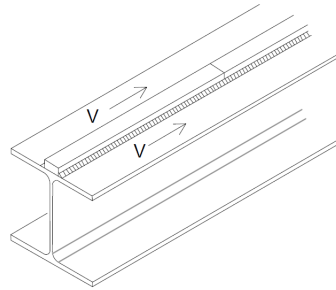


Figura 6.18: Modelo para cálculo de tensões no pormenor 7

## 6.6 Resultados

Na presente secção são apresentados os resultados obtidos e tratados por meio de uma folha de cálculo. Apresentam-se os históricos de tensão nos pormenores de cada apoio da estrutura, correspondendo ao funcionamento de uma e duas gruas. Posteriormente, apresentam-se em tabelas os resultados das análises à fadiga para cada pormenor pelo método de acumulação de dano e pelo método de dano equivalente. É também apresentada a recomendação da qualidade do aço com base na abordagem descrita na secção 3. A representação gráfica dos históricos de tensão, do método da gota de água e do método do reservatório são apresentados em anexo dada a extensão de elementos apresentados.

### 6.6.1 Verificação de segurança

Nos métodos de acumulação de danos, é fundamental elaborar o histórico de tensões de forma a posteriormente contabilizar os ciclos de tensões instaladas na estrutura. No método de tensão de dano equivalente, é apenas necessário determinar a amplitude de tensões (diferença entre as tensões máximas e mínimas).

Os limites de fadiga a amplitude constante,  $\Delta\sigma_D$ , e os limites de truncatura,  $\Delta\sigma_L$ , para cada pormenor estrutural são apresentados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11: Limites de fadiga a amplitude constante e limites de truncatura [27].

Pormenor	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_L$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	80	70	51	28
2	36	31	23	13
3	100	87	64	35
4	80	70	51	28
5	160	139	103	56
6	50	43	32	18
7	80	70	51	28

Nas tabelas seguintes, optou-se apenas por indicar os resultados dos pormenores cuja amplitude de tensão fosse mais relevante em termos de verificação de fadiga, visto que muitas das tensões contabilizadas eram inferiores a  $5\text{N/mm}^2$  e não intervinham na vida à fadiga. Assim, apresentam-se apenas os casos cuja amplitude de tensão seja mais elevada (entre os valores de  $\Delta\sigma_R$  obtidos) ou que seja superior ao limite de truncatura,  $\Delta\sigma_L$ .

Quanto à representação gráfica dos métodos de acumulação de danos, são apresentadas as aplicações dos métodos apenas em dois gráficos (os mais ilustrativos) para os casos onde esses métodos são mais notórios, ou seja, casos em que a vida de fadiga é mais reduzida.

### Métodos de acumulação de danos

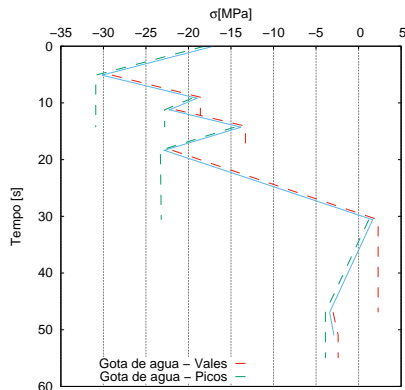


Figura 6.19: Representação gráfica do método da gota de água associado ao pormenor 5 no apoio 2.

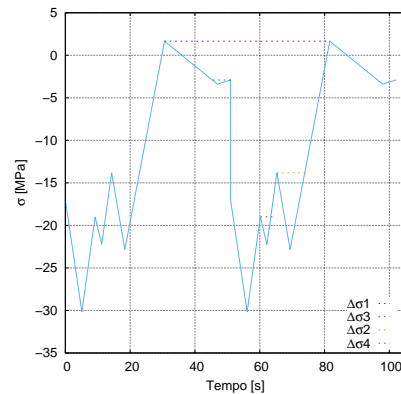


Figura 6.20: Representação gráfica do método do reservatório associado ao pormenor 5 no apoio 2.



Tabela 6.12: Resultados dos métodos de acumulação de danos para uma ponte rolante.

	Pormenor	Método da gota de água				Método do reservatório			
		$\Delta\sigma_R[N/mm^2]$	$n_i$	$D_i$	Vida de fadiga	$\Delta\sigma_R[N/mm^2]$	$n_i$	$D_i$	Vida de fadiga
Apoio 1	1	17	2555000	0*	> 25 anos	17	5110000	0*	> 25 anos
	2	26	2555000	0,73	> 25 anos	26	5110000	1,42	18 anos
	3	20	2555000	0*	> 25 anos	20	5110000	0*	> 25 anos
	4	19	2555000	0*	> 25 anos	19	5110000	0*	> 25 anos
Apoio 2	1	20	2555000	0*	> 25 anos	20	5110000	0*	> 25 anos
	2	33	2555000	1,49	13 anos	33	5110000	2,90	9 anos
		22	2555000	0,40					
	3	24	2555000	0*	> 25 anos	24	5110000	0*	> 25 anos
	4	23	2555000	0*	> 25 anos	23	5110000	0*	> 25 anos
Apoio 3	1	20	2555000	0*	> 25 anos	20	5110000	0*	> 25 anos
	2	32	5110000	2,73	9 anos	32	10220000	5,07	5 anos
	3	24	5110000	0*	> 25 anos	24	5110000	0*	> 25 anos
	4	23	2555000	0*	> 25 anos	23	5110000	0*	> 25 anos
	5	29	5110000	0*	> 25 anos	29	5110000	0*	> 25 anos
Apoio 4	1	20	2555000	0*	> 25 anos	20	5110000	0*	> 25 anos
	2	33	2555000	1,49	13 anos	33	5110000	2,82	9 anos
		22	2555000	0,40					
	3	24	2555000	0*	> 25 anos	24	5110000	0*	> 25 anos
	4	23	2555000	0*	> 25 anos	23	5110000	0*	> 25 anos
Apoio 5	1	15	2555000	0*	> 25 anos	15	5110000	0*	> 25 anos
	2	24	2555000	0,57	> 25 anos	24	5110000	1,02	24 anos
	3	18	2555000	0*	> 25 anos	17	5110000	0*	> 25 anos
	4	17	2555000	0*	> 25 anos	17	5110000	0*	> 25 anos

Tabela 6.13: Resultados dos métodos de acumulação de danos para duas pontes rolantes.

	Pormenor	Método da gota de água				Método do reservatório			
		$\Delta\sigma_R[N/mm^2]$	$n_i$	$D_i + D_{dup}$	Vida de fadiga	$\Delta\sigma_R[N/mm^2]$	$n_i$	$D_i + D_{dup}$	Vida de fadiga
Apoio 1	1	24	2847000	0*	> 25 anos	24	5694000	0*	> 25 anos
	2	38	2847000	3,27	8 anos	38	5694000	6,27	4 anos
	3	30	2847000	0*	> 25 anos	30	5694000	0*	> 25 anos
	4	29	2847000	0,03	> 25 anos	29	5694000	0*	> 25 anos
Apoio 2	1	37	2847000	0,11	> 25 anos	37	5694000	0,22	> 25 anos
	2	60	2847000	11,51	2 anos	60	5694000	22,22	1 anos
		25	2847000	1,12					
	3	45	2847000	0,09	> 25 anos	45	5694000	0,19	> 25 anos
	4	43	2847000	0,23	> 25 anos	43	5694000	0,47	> 25 anos
Apoio 3	1	37	2847000	0*	> 25 anos	54	5694000	0*	> 25 anos
	2	37	5694000	0,22	> 25 anos	37	5694000	0,20	> 25 anos
	3	57	5694000	19,92	1 ano	57	11388000	39,40	1 ano
	4	45	5694000	0,19	> 25 anos	45	5694000	0,19	> 25 anos
	5	43	5694000	0,47	> 25 anos	43	5694000	0,47	> 25 anos
Apoio 4	1	51	5694000	0*	> 25 anos	51	5694000	0*	> 25 anos
	2	37	2847000	0,11	> 25 anos	37	5694000	0,21	> 25 anos
	3	60	2847000	12,35	2 anos	60	5694000	21,87	2 anos
		25	2847000	0,72					
	4	45	2847000	0,09	> 25 anos	45	5694000	0,19	> 25 anos
Apoio 5	1	43	2847000	0,23	> 25 anos	43	5694000	0,47	> 25 anos
	2	53	2847000	0*	> 25 anos	53	5694000	0*	> 25 anos
	3	23	2847000	0*	> 25 anos	22	5694000	0*	> 25 anos
	4	35	2847000	3,01	8 anos	35	5694000	4,71	5 anos

## Método de tensão equivalente

Tabela 6.14: Resultados pelo método de tensão equivalente para uma ponte rolante.

	Pormenor	$\Delta\sigma_E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\frac{\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}$	Vida de fadiga
Apoio 1	1	16,05	26,88	0,39	> 25 anos
	2	25,73	43,09	1,38	19 anos
	3	19,67	27,40	0,32	> 25 anos
	4	18,85	26,25	0,38	> 25 anos
	5	-	-	-	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,19	0,26	0,004	> 25 anos
Apoio 2	1	19,28	32,28	0,46	> 25 anos
	2	32,66	54,68	1,75	15 anos
	3	23,62	32,89	0,38	> 25 anos
	4	22,63	31,52	0,45	> 25 anos
	5	31,81	53,27	0,38	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,25	0,34	0,004	> 25 anos
Apoio 3	1	19,44	32,56	0,47	> 25 anos
	2	31,22	52,27	1,67	15 anos
	3	23,82	33,18	0,38	> 25 anos
	4	22,83	31,80	0,46	> 25 anos
	5	28,75	48,14	0,35	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,33	0,46	0,006	> 25 anos
Apoio 4	1	19,44	32,56	0,47	> 25 anos
	2	32,34	54,15	1,73	15 anos
	3	23,83	33,18	0,38	> 25 anos
	4	22,83	31,80	0,46	> 25 anos
	5	30,64	51,30	0,37	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,40	0,56	0,008	> 25 anos
Apoio 5	1	14,44	24,18	0,35	> 25 anos
	2	23,09	38,66	1,26	20 anos
	3	17,67	24,60	0,28	> 25 anos
	4	16,93	23,58	0,34	> 25 anos
	5	-	-	-	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,35	0,49	0,007	> 25 anos

Tabela 6.15: Resultados pelo método de dano equivalente para duas pontes rolantes.

	Pormenor	$\Delta\sigma_E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\frac{\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}$	Vida de fadiga
Apoio 1	1	23,90	25,21	0,36	> 25 anos
	2	37,40	39,47	1,26	20 anos
	3	29,29	30,91	0,36	> 25 anos
	4	28,07	29,61	0,42	> 25 anos
	5	-	-	-	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,19	0,2	0,002	> 25 anos
Apoio 2	1	36,27	38,26	0,55	> 25 anos
	2	60	62,53	1,99	13 anos
	3	44,43	46,87	0,54	> 25 anos
	4	42,58	44,93	0,64	> 25 anos
	5	53,76	56,71	0,40	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,33	0,35	0,005	> 25 anos
Apoio 3	1	36,36	38,35	0,55	> 25 anos
	2	56,98	60,11	1,92	15 anos
	3	44,53	46,98	0,54	> 25 anos
	4	42,68	45,02	0,65	> 25 anos
	5	50,77	53,57	0,38	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,41	0,43	0,006	> 25 anos
Apoio 4	1	36,57	38,59	0,55	> 25 anos
	2	58,92	62,16	1,98	13 anos
	3	44,81	47,27	0,54	> 25 anos
	4	42,95	45,30	0,65	> 25 anos
	5	52,48	55,36	0,39	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,50	0,53	0,007	> 25 anos
Apoio 5	1	22,02	23,23	0,33	> 25 anos
	2	34,18	36,10	1,15	22 anos
	3	26,97	28,45	0,32	> 25 anos
	4	25,85	27,30	0,39	> 25 anos
	5	-	-	-	> 25 anos
	6	-	-	-	> 25 anos
	7	0,42	0,44	0,007	> 25 anos

### 6.6.2 Recomendação de subclasse do aço

De forma a seleccionar a qualidade de aço mais adequada à resistência à rotura frágil para o caso de estudo, considerou-se uma temperatura de referência de  $-15^\circ\text{C}$ . Dos esforços resultantes do modelo, considerando a respetiva combinação de ações, obtiveram-se as tensões de cálculo,  $\sigma_{Edmax}$ , para o tipo de ligação estudada.

- Parafusos:  $\sigma_{Ed} = 504\text{N/mm}^2$
- Soldaduras viga-pilar:  $\sigma_{Ed} = 54\text{N/mm}^2$

Pela Tabela 3.2, a tensão de dimensionamento é  $345\text{N/mm}^2$ , resultando num nível de tensão,  $\sigma_{Ed}/f_y(t)$ , respetivamente:

- Parafusos:  $\frac{504}{345} = 1,46$
- Soldaduras viga-pilar:  $\frac{54}{345} = 0,15$

O pormenor de maior interesse para este caso é naturalmente o mais gravoso (pormenor 2). Para este pormenor, consultando a Tabela 3.3, obtém-se então um aço S355 J0, não obstante se poder selecionar uma subclasse superior.

## Capítulo 7

# Conclusão

### 7.1 Considerações finais

Na presente dissertação abordou-se a temática de verificação de segurança à fadiga de pormenores construtivos de estruturas de suporte de pontes rolantes através de três métodos de análise distintos: método da gota de água; método do reservatório e método de tensão equivalente.

Elaborou-se um modelo tridimensional do edifício em causa, tendo sido considerados dois casos distintos; um caso em que na estrutura apenas funcionava uma ponte rolante, e um segundo caso, em que funcionavam duas pontes rolantes em simultâneo e lado a lado, configurando a posição mais desfavorável das cargas para a estrutura.

Os resultados apresentados permitiram concluir que o elemento da estrutura mais solicitado é o apoio 3 (ponto de simetria da estrutura), e o pormenor 2 é o mais condicionante em termos de vida de fadiga, nos três métodos abordados. As razões justificativas para a não verificação de segurança deste pormenor residem na sua baixa resistência à fadiga ( $\Delta\sigma_C = 36N/mm^2$ ) em comparação com as tensões atuantes e tendo em conta o cordão de soldadura adotado ( $a = 6mm$ ). Numa análise posterior dos resultados, verificou-se que o cordão de soldadura do pormenor 2 que verificasse a segurança à fadiga pelos três métodos teria de possuir uma espessura  $a = 20mm$ . Uma solução para evitar problemas de fadiga em ligações soldadas passa por evitar ligações com tendência de aparecimento de fendas na raiz da soldadura (caso do pormenor 2), visto que as técnicas de melhoramento de soldadura se apresentam como boas soluções de tratamento pós-soldadura na resistência à fadiga, para situações em que as fendas tendam a ocorrer no pé da soldadura. Importa ainda referir que, em relação à ligação com parafusos, não se obtiveram resultados na verificação à fadiga visto que as tensões atuantes nunca foram superiores às tensões resultantes da força de pré-esforço. Caso as tensões atuantes nunca fossem mais elevadas, o comportamento dos parafusos à fadiga seria igualmente analisado pelos métodos apresentados.

Os métodos de análise utilizados no presente trabalho são referenciados no Eurocódigo 3, mas o método de tensão equivalente é o adotado em [35] para verificação à fadiga.

Os resultados que se obtiveram no presente trabalho confirmam as descrições apresentadas na literatura sobre os métodos de análise. Os métodos de acumulação de dano apresentaram resultados mais conservativos, corroborando as descrições apresentadas no presente trabalho, devido a uma contabilização discriminada das tensões atuantes na estrutura através do seu histórico de tensões, ao contrário do método de tensão equivalente, cuja aplicação apenas implica um fator de dano associado ao conjunto de cargas.

Relativamente à rotura frágil do aço, para uma temperatura de projeto de  $-15^{\circ}\text{C}$ , conclui-se que as condições adequadas de entrega do aço exigiriam um aço S355 J0 para as condições apresentadas no presente trabalho.

Visto que o comportamento do aço à rotura frágil está intimamente ligado às características microestruturais do material, conclui-se ainda que a qualidade do aço adequada a utilizar nesta estrutura, fortemente solicitada a ações cíclicas, seria N/NL ou M/ML.

## 7.2 Desenvolvimentos futuros

Em trabalhos futuros, sugere-se a análise de diversos tipos de pormenores de ligações soldadas e aparafusadas. Sugere-se também uma comparação mais aprofundada entre o método de tensão equivalente e o método de acumulação de danos, com o objetivo de avaliar, em termos de projeto estrutural, qual o método mais adequado para verificação de segurança à fadiga.

O estudo mais aprofundado das técnicas de melhoramento dos cordões de soldadura e da influência que estas técnicas podem ter na vida de fadiga constitui também um assunto pertinente a desenvolver futuramente.

Outra tópico pertinente a desenvolver é o estudo da influência que a qualidade do aço tem em termos quantitativos na verificação de segurança à fadiga e a relação entre a microestrutura do aço e o modo de propagação de fendas por fadiga, já que tais aspetos assumem grande importância relativamente ao melhoramento dos aços com menor suscetibilidade à fadiga.

# Referências bibliográficas

- [1] *Demag Cranes and Components*. [www.demagcranes.co.in](http://www.demagcranes.co.in).
- [2] *ArcelorMittal*, 2018. <http://sections.arcelormittal.com/functions/home.html>.
- [3] Abecassis, T. ;Branco, F.: *Pontes Rolantes e Vigas de Caminho de Rolamento*. Centro de Mecânica e Engenharia Estruturais, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1993.
- [4] B. E. Gorenc, R. Tinyou, A. A. Syam: *Steel designers handbook*. University of New South Press Ltd, 2012. 8th Edition.
- [5] Brockenbrough, Frederick S. Merritt: *Structural steels designer's handbook*. 1999. 3rd Edition.
- [6] Computers e Structures Inc.: *Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*, July 2016.
- [7] D. G. Brown, D.C. Iles: *Selection of steel sub-grade in accordance with the Eurocodes*. The Steel Construction Institute, 2012. 7th Edition.
- [8] Davis, Joseph R.: *Metals Handbook Desk Edition*. ASM International Handbook Committee, 1998. 2nd Edition.
- [9] Dowling, N. E.: *Mechanical Behavior of Materials*. 2013. 4th Edition.
- [10] Dymond, J. S.: *Reliability based codification for the design of overhead travelling crane support structures*. Tese de Doutoramento, University of Stellenbosch, December 2005.
- [11] Fahdah, I.: *Crane Runway Girder*. <http://sites.google.com/site/ifahdah/home/lectures>, 2011-2012.
- [12] Federation Europeenne de la Manutention: *Rules for the design of hoisting appliances*, 3rd edition edição, October 1998.
- [13] Frýba, L.: *Dynamic of Railway Bridges, Thomas Telford, Praga*. 1996.
- [14] Freitas, M. J. Santos: *Verificação de Segurança à Fadiga de Pontes Rodoviárias*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia , Universidade do Porto, Junho 2014.
- [15] Johnson, Johnny: *Fatigue improvement techniques for welds*. processbarron. [www.processbarron.com](http://www.processbarron.com).

- [16] Marques, F. M. de Sousa: *Avaliação do Comportamento Estrutural e Análise de Fadiga em Pontes Metálicas Ferroviárias*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Setembro 2006.
- [17] Mista, Associação Portuguesa de Construção Metálica e: *Fadiga*. 2002.
- [18] Nussbaumer, A. C.: *Course on fatigue and fracture mechanics*, June 2008.
- [19] Nussbaumer, A. ;Borges, L. ; Davaine L.: *Fatigue Design of Steel and Composite Structures*, 2011.
- [20] Oliveira, Nuno M. M.: *Análise comparativa de soluções em betão, aço e madeira para pavilhões*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [21] P. J. Haagenzen, S.J. Maddox: *IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures*. The International institute of Welding, July 2001.
- [22] Qualidade, Instituto Português da: *Eurocódigo 0 - Bases para o projecto de estruturas*, Dezembro 2009.
- [23] Qualidade, Instituto Português da: *Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, Fevereiro 2010.
- [24] Qualidade, Instituto Português da: *Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, Março 2010.
- [25] Qualidade, Instituto Português da: *Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço, Parte 1-8: Projeto de ligações*, Março 2010.
- [26] Qualidade, Instituto Português da: *Eurocódigo 3 -Projeto de estruturas de aço - Parte 1-10: Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura*, Março 2010.
- [27] Qualidade, Instituto Português da: *Eurocódigo 3 -Projeto de estruturas de aço - Parte 1-9: Fadiga*, Março 2010.
- [28] Reis, A. J.: *Dimensionamento de Estruturas Metálicas*, 2008.
- [29] Roldan, U. X.: *Toolbox for fatigue analysis of beam structures and its possible application to railways*. Tese de Mestrado, Chalmers University of Technology, 2007.
- [30] Sarna, Satyendra Kumar: *Normalizing process for steels*. <http://ispatguru.com/normalizing-process-for-steels/>, April 2014. Acedido: 2018-02-22.
- [31] Sarna, Satyendra Kumar: *Defects in thermo mechanical processing of metals*. <http://ispatguru.com/defects-in-thermo-mechanical-processing-of-metals/>respond, December 2016. Acedido: 2018-02-22.



- [32] Silva Carvalho, Vitor José da: *Utilização dos Eurocódigos na construção metálica*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Setembro 2011.
- [33] Standardization, European Committee for: *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature*, July 2001.
- [34] Standardization, European Committee for: *Hot rolled products of structural steels - Part 1: General technical delivery conditions*, November 2004.
- [35] Standardization, European Committee for: *Eurocode 1 - Actions on structures - Part 3: Actions induced by cranes and machinery*, July 2006.
- [36] Standardization, European Committee for: *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 6: Crane supporting structures*, April 2007.
- [37] Thompson, G.: *Best practice of crane support structures design - An expert survey*. Tese de Mestrado, University of Stellenbosch, December 2007.



# Apêndice



## Histórico de tensões

### Apoio 1

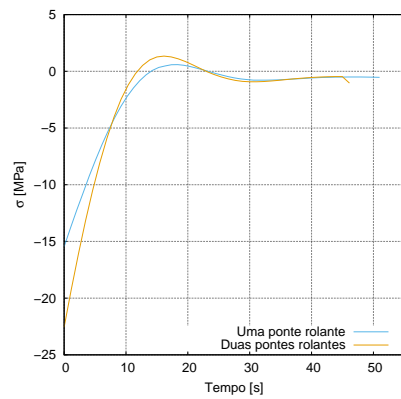


Figura 1: Histórico de tensões - Pormenor 1.

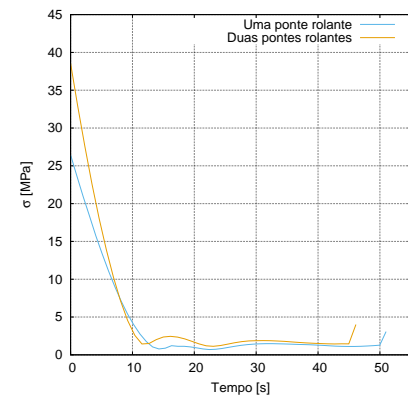


Figura 2: Histórico de tensões - Pormenor 2.

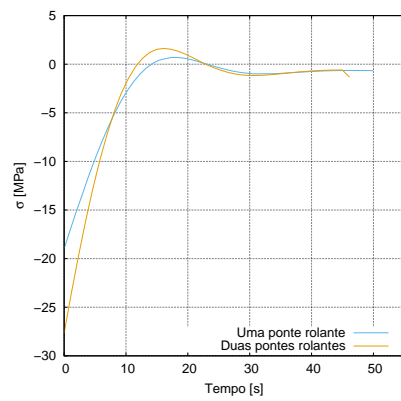


Figura 3: Histórico de tensões - Pormenor 3.

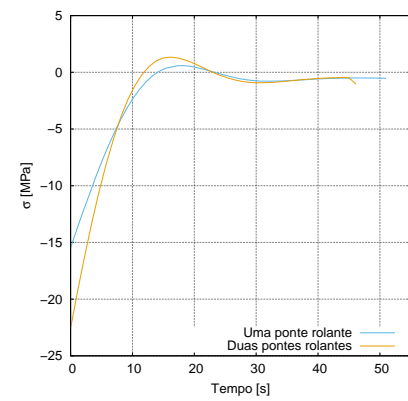


Figura 4: Histórico de tensões - Pormenor 4.

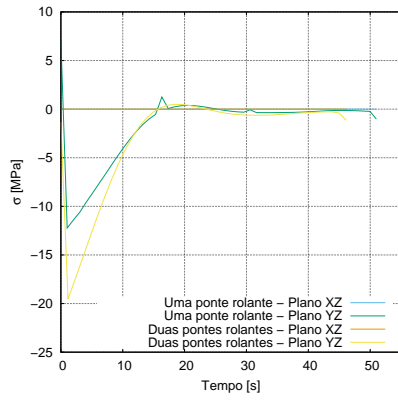


Figura 5: Histórico de tensões - Pormenor 6.

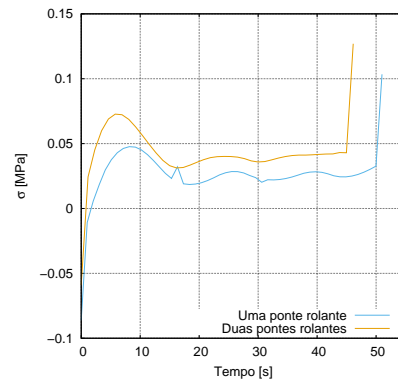


Figura 6: Histórico de tensões - Pormenor 7.

## Apoio 2

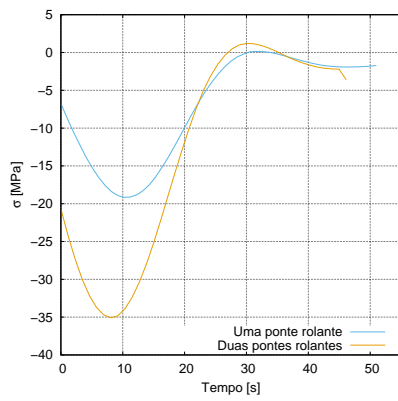


Figura 7: Histórico de tensões - Pormenor 1.

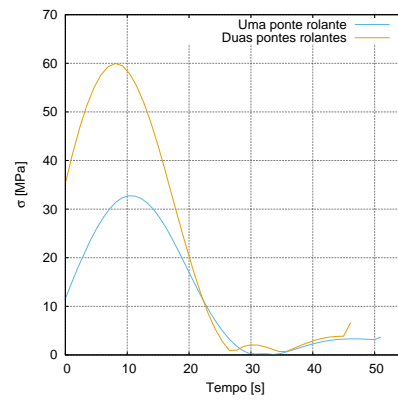


Figura 8: Histórico de tensões - Pormenor 2.

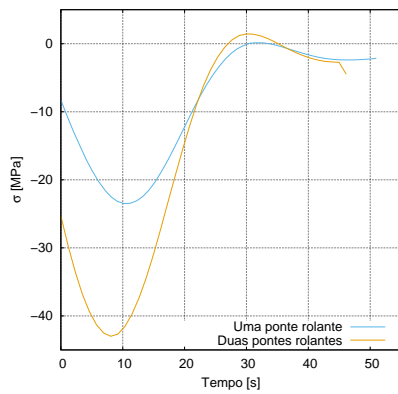


Figura 9: Histórico de tensões - Pormenor 3.

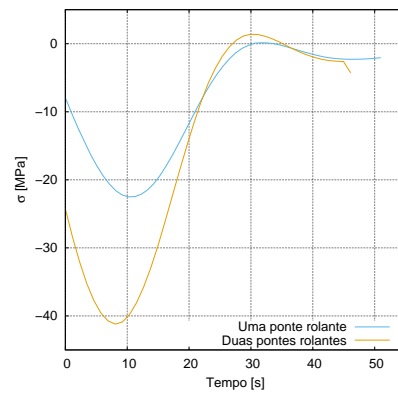


Figura 10: Histórico de tensões - Pormenor 4.

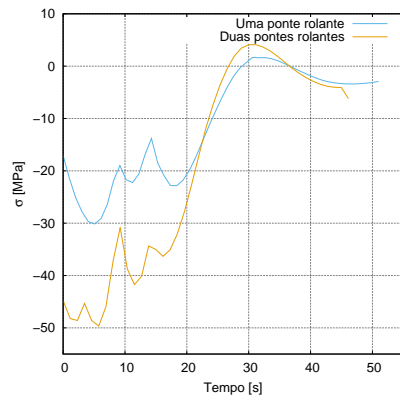


Figura 11: Histórico de tensões - Pormenor 5.

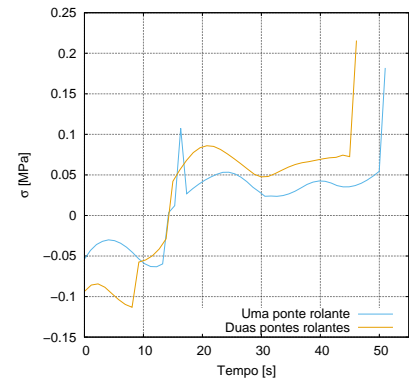


Figura 12: Histórico de tensões - Pormenor 7.

### Apoio 3

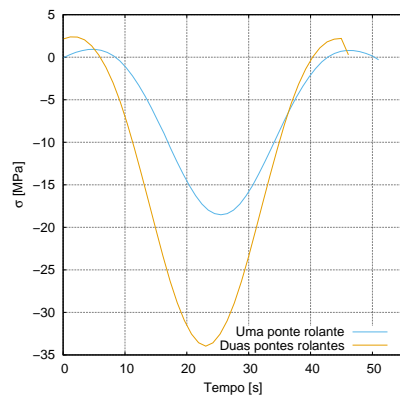


Figura 13: Histórico de tensões - Pormenor 1.

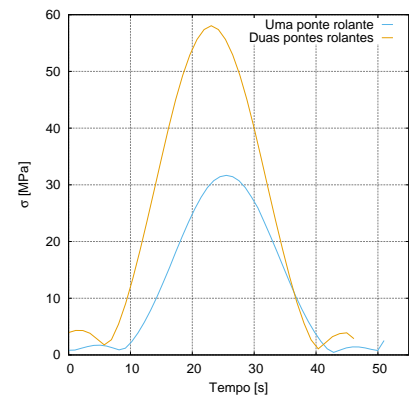


Figura 14: Histórico de tensões - Pormenor 2.

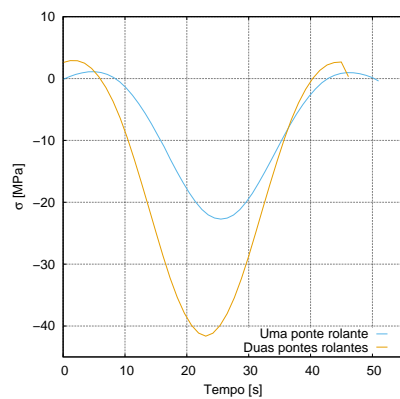


Figura 15: Histórico de tensões - Pormenor 3.

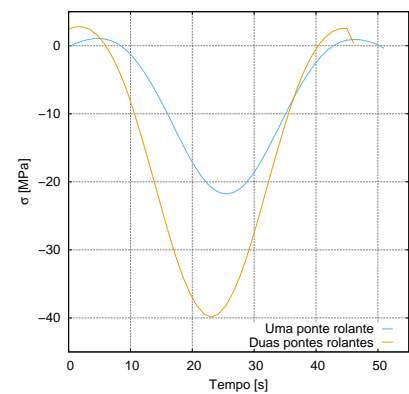


Figura 16: Histórico de tensões - Pormenor 4.

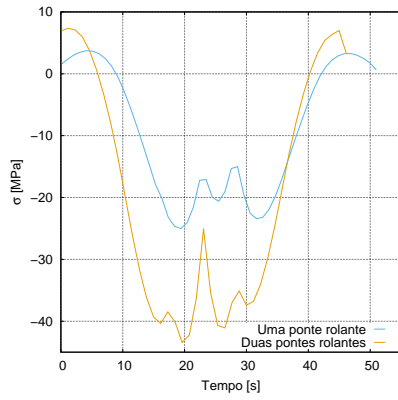


Figura 17: Histórico de tensões - Pormenor 5.

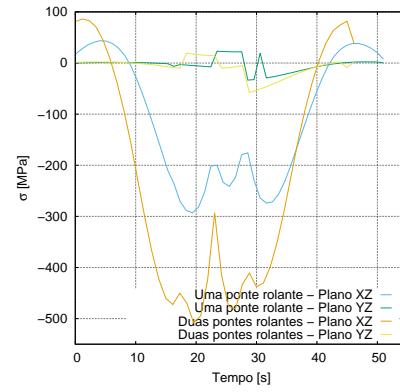


Figura 18: Histórico de tensões - Pormenor 6.

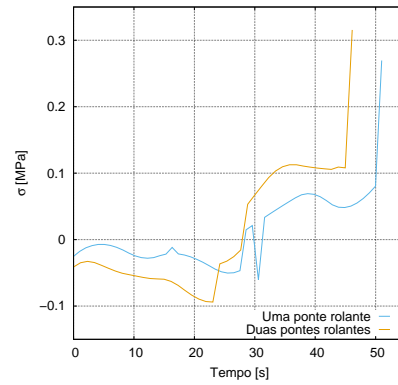


Figura 19: Histórico de tensões - Pormenor 7.

## Apoio 4

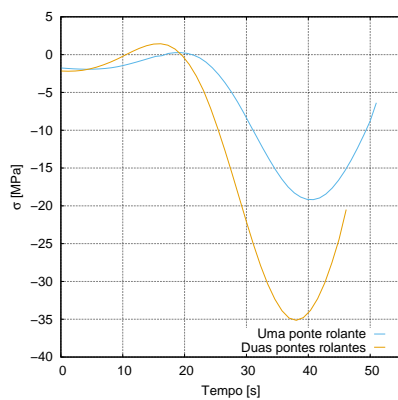


Figura 20: Histórico de tensões - Pormenor 1.

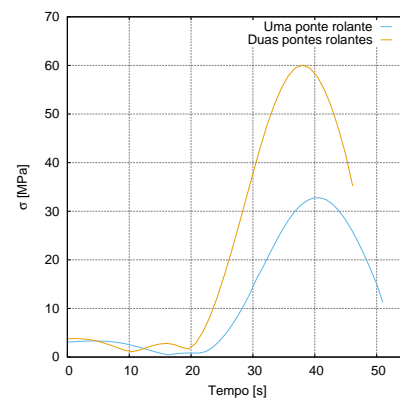


Figura 21: Histórico de tensões - Pormenor 2.



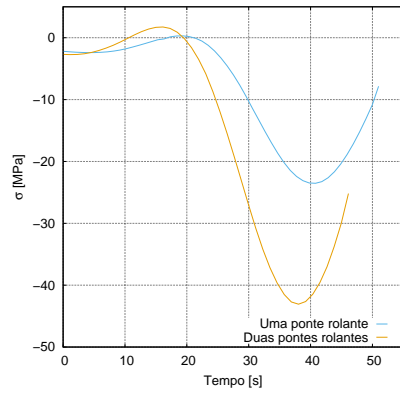


Figura 22: Histórico de tensões - Pormenor 3.

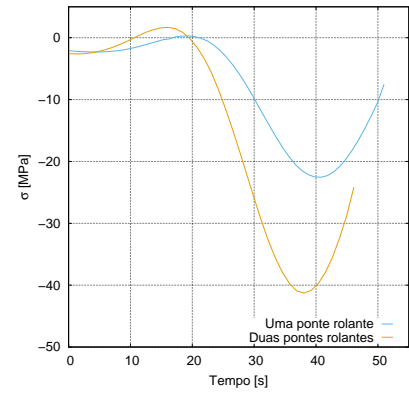


Figura 23: Histórico de tensões - Pormenor 4.

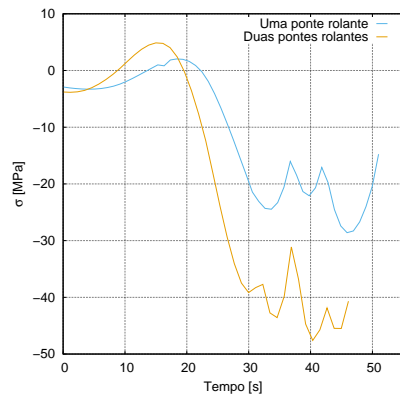


Figura 24: Histórico de tensões - Pormenor 5.

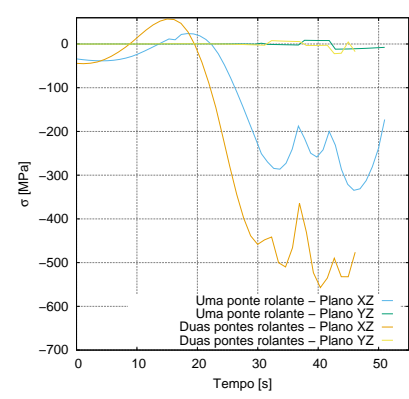


Figura 25: Histórico de tensões - Pormenor 6.

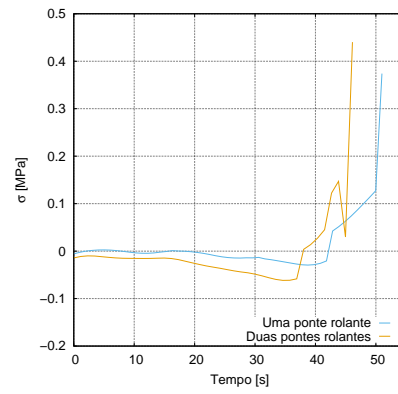


Figura 26: Histórico de tensões - Pormenor 7.

## Apoio 5

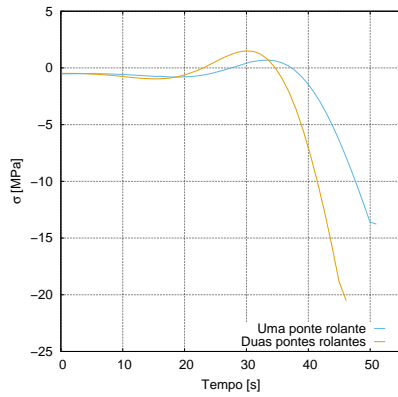


Figura 27: Histórico de tensões - Pormenor 1.

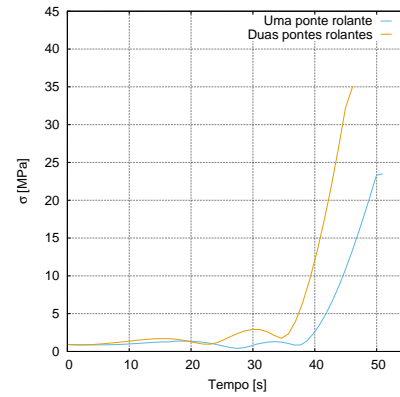


Figura 28: Histórico de tensões - Pormenor 2.

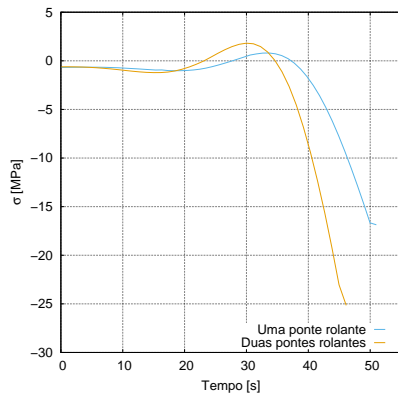


Figura 29: Histórico de tensões - Pormenor 3.

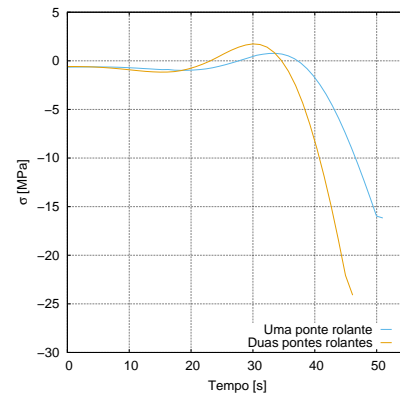


Figura 30: Histórico de tensões - Pormenor 4.

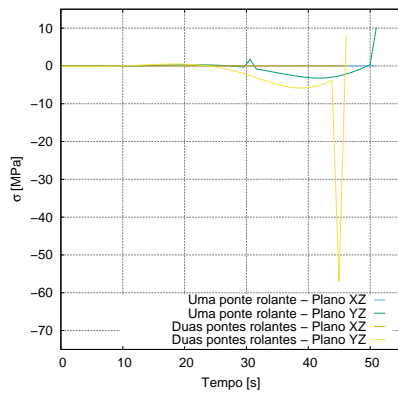


Figura 31: Histórico de tensões - Pormenor 6.

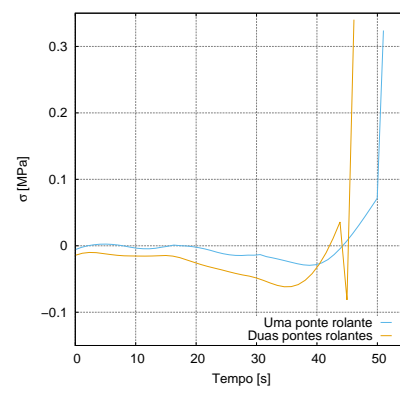


Figura 32: Histórico de tensões - Pormenor 7.

## Método da gota de água

### Apoio 1

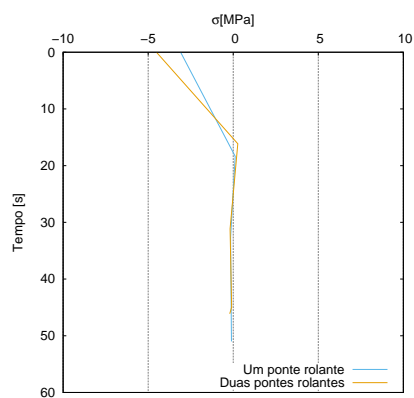


Figura 33: Método da gota de água - Pormenor 1.

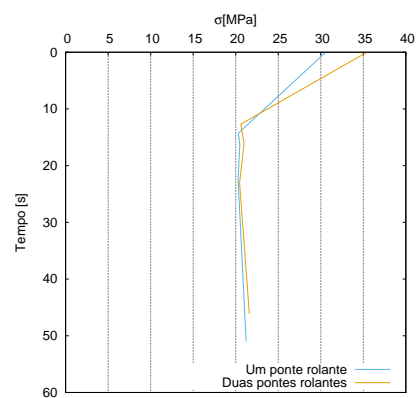


Figura 34: Método da gota de água - Pormenor 2.

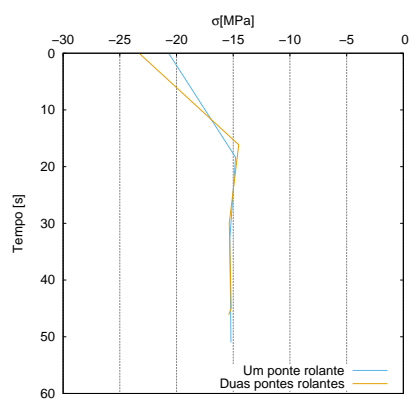


Figura 35: Método da gota de água - Pormenor 3.

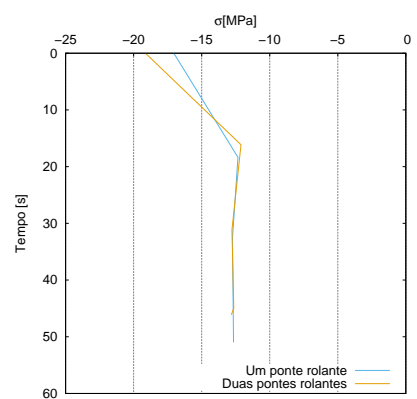


Figura 36: Método da gota de água - Pormenor 4.

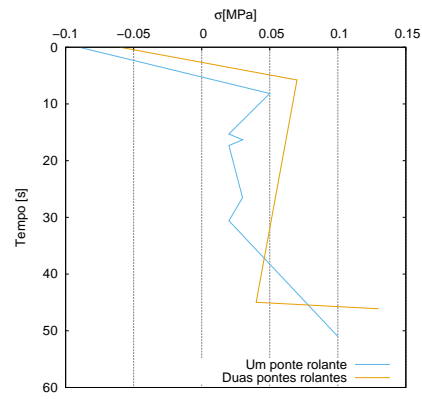


Figura 37: Método da gota de água - Pormenor 7.

## Apoio 2

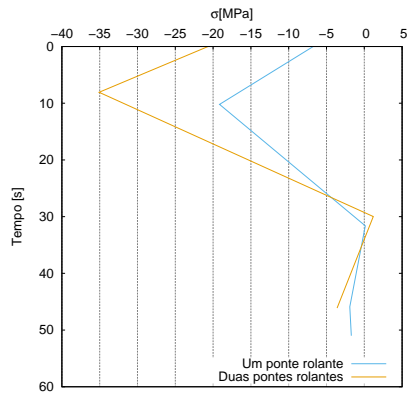


Figura 38: Método da gota de água - Pormenor 1.

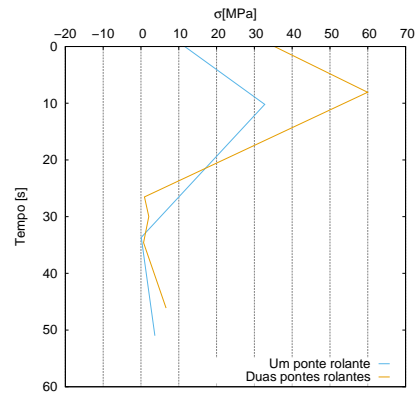


Figura 39: Método da gota de água - Pormenor 2.

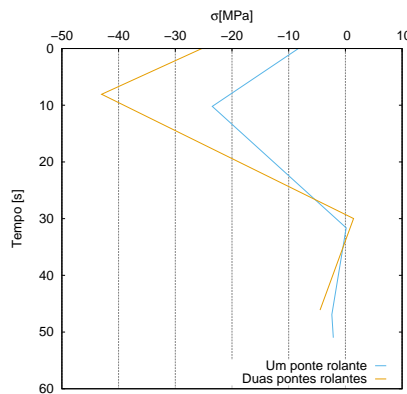


Figura 40: Método da gota de água - Pormenor 3.

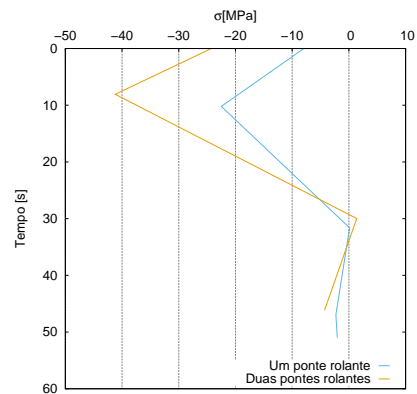


Figura 41: Método da gota de água - Pormenor 4.

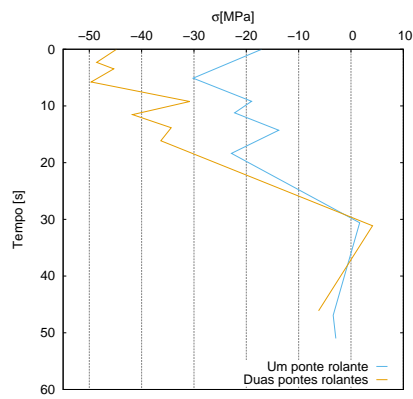


Figura 42: Método da gota de água - Pormenor 5.

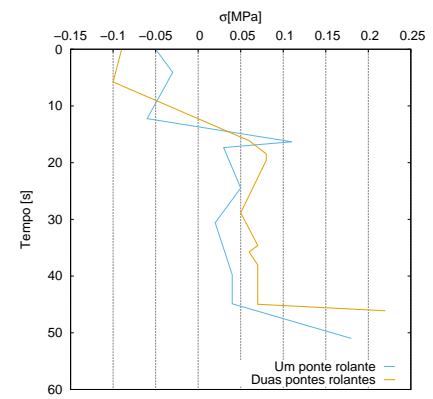


Figura 43: Método da gota de água - Pormenor 7.

### Apoio 3

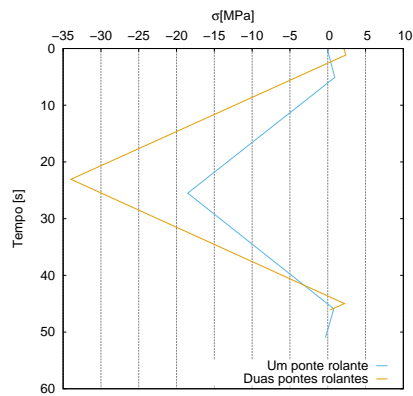


Figura 44: Método da gota de água - Pormenor 1.

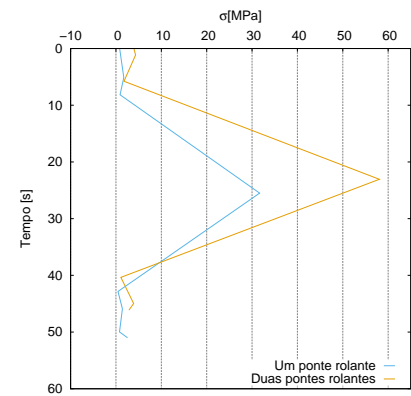


Figura 45: Método da gota de água - Pormenor 2.

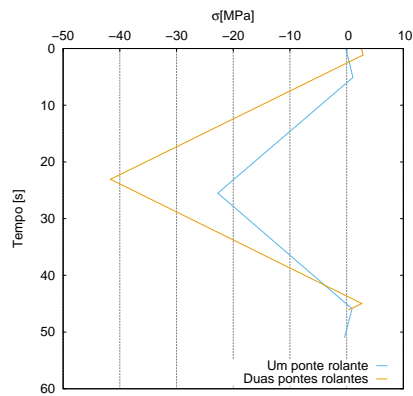


Figura 46: Método da gota de água - Pormenor 3.

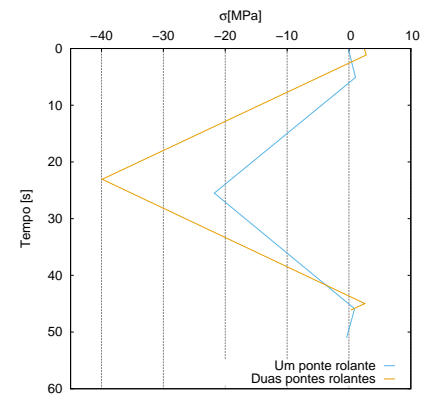


Figura 47: Método da gota de água - Pormenor 4.

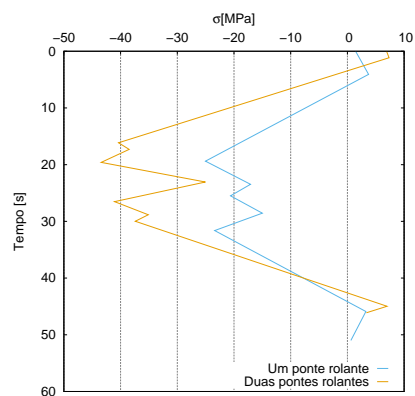


Figura 48: Método da gota de água - Pormenor 5.

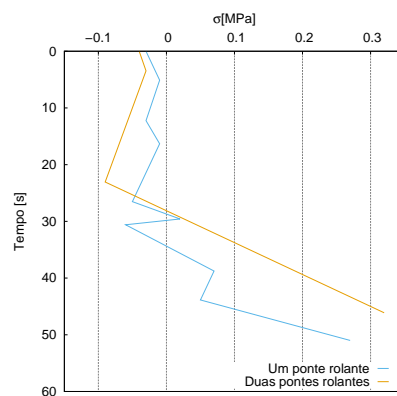


Figura 49: Método da gota de água - Pormenor 7.

## Apoio 4

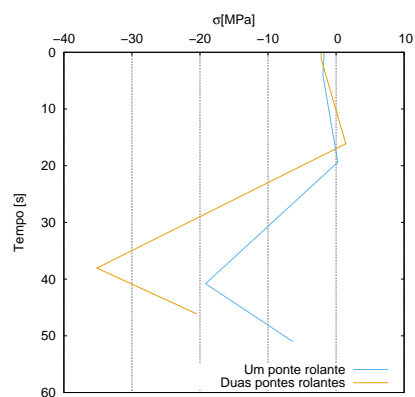


Figura 50: Método da gota de água - Pormenor 1.

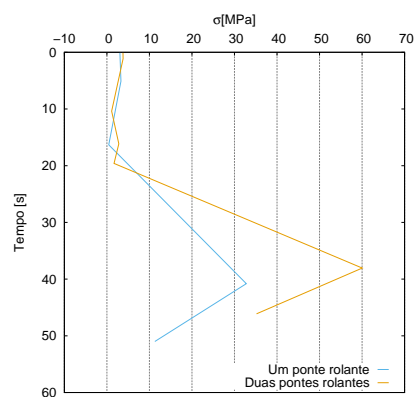


Figura 51: Método da gota de água - Pormenor 2.

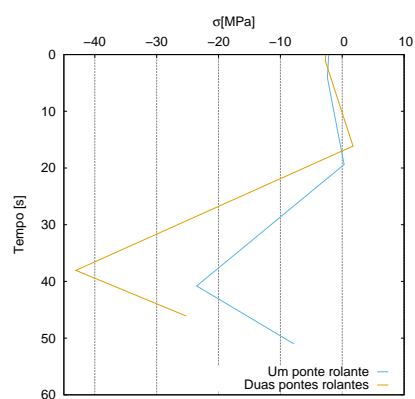


Figura 52: Método da gota de água - Pormenor 3.

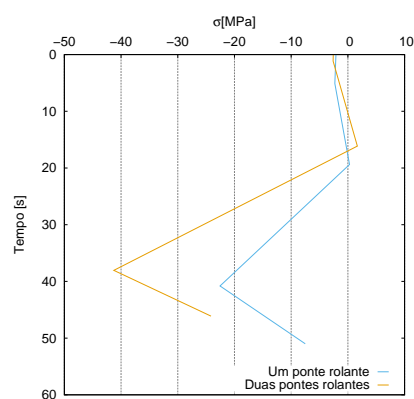


Figura 53: Método da gota de água - Pormenor 4.

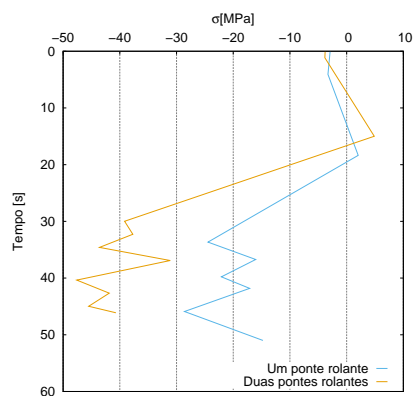


Figura 54: Método da gota de água - Pormenor 5.

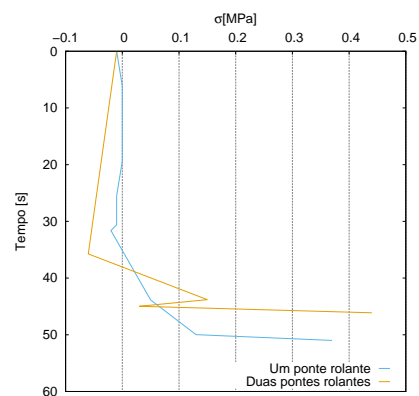


Figura 55: Método da gota de água - Pormenor 7.

## Apoio 5

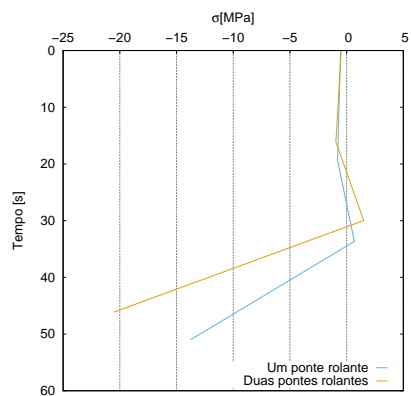


Figura 56: Método da gota de água - Pormenor 1.

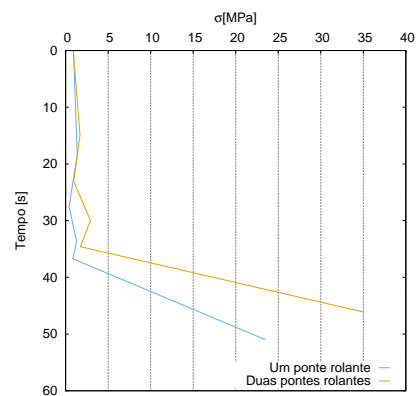


Figura 57: Método da gota de água - Pormenor 2.

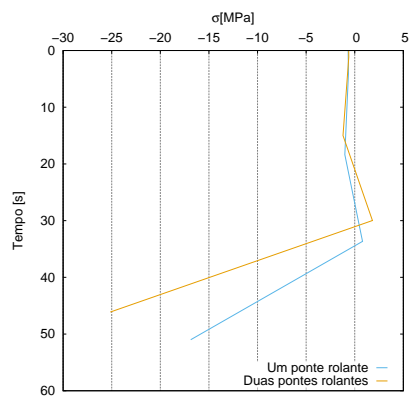


Figura 58: Método da gota de água - Pormenor 3.

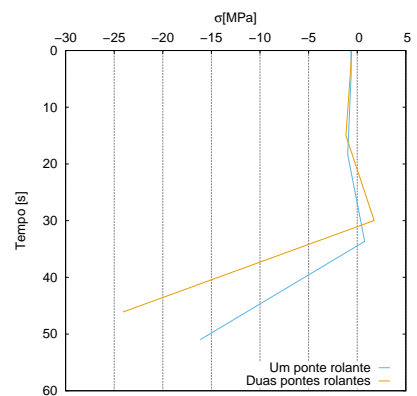


Figura 59: Método da gota de água - Pormenor 4.

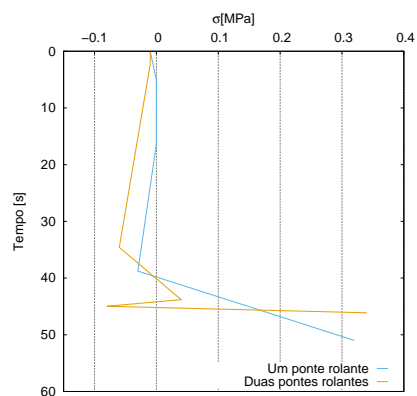


Figura 60: Método da gota de água - Pormenor 7.

## Método do reservatório

### Apoio 1

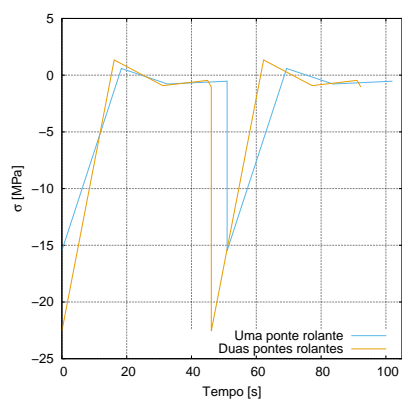


Figura 61: Método do reservatório - Pormenor 1.

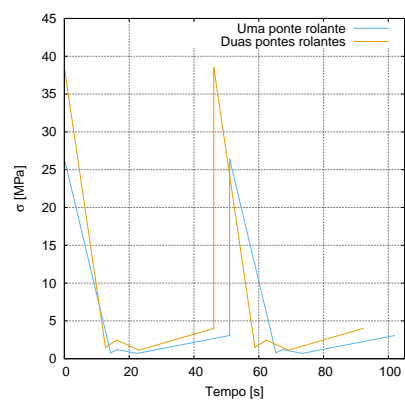


Figura 62: Método do reservatório - Pormenor 2.

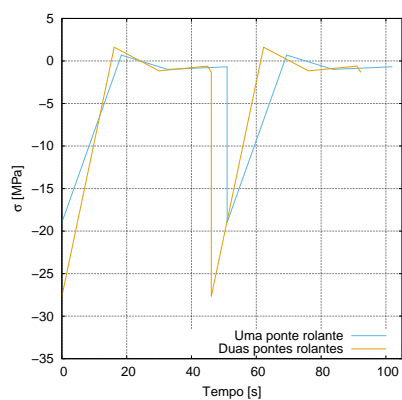


Figura 63: Método do reservatório - Pormenor 3.

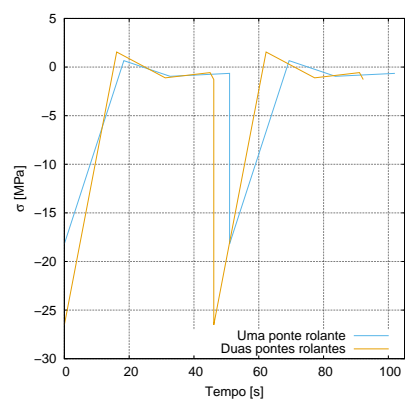


Figura 64: Método do reservatório - Pormenor 4.



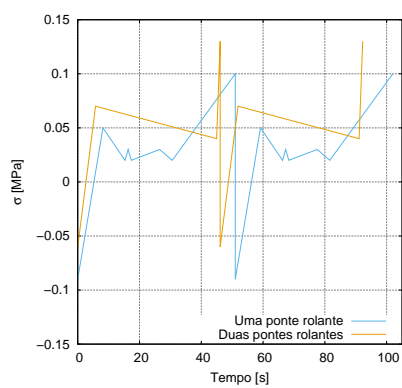


Figura 65: Método do reservatório - Pormenor 7.

## Apoio 2

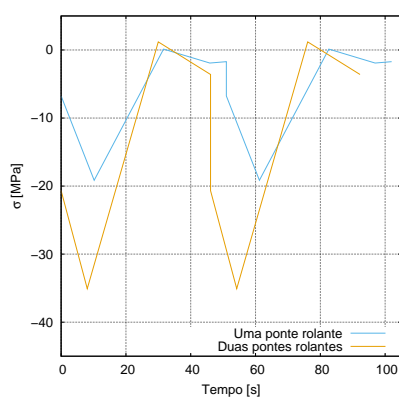


Figura 66: Método do reservatório - Pormenor 1.

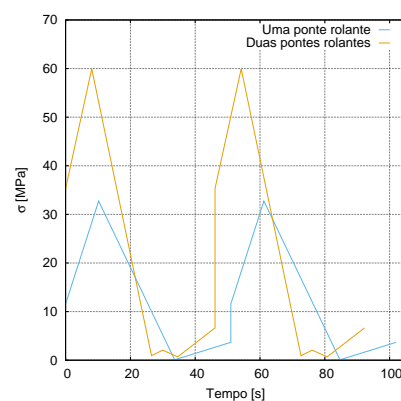


Figura 67: Método do reservatório - Pormenor 2.

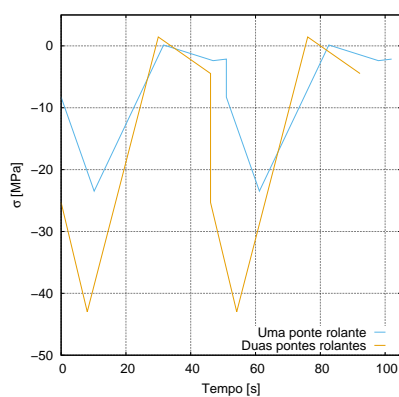


Figura 68: Método do reservatório - Pormenor 3.

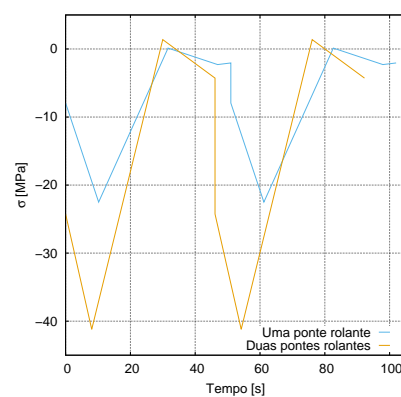


Figura 69: Método do reservatório - Pormenor 4.

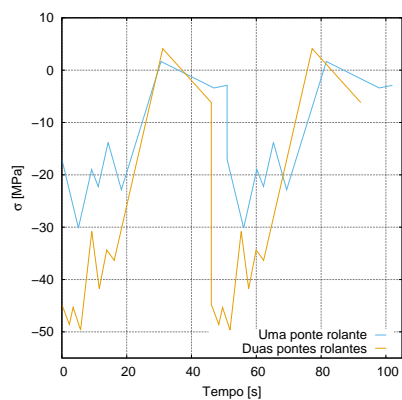


Figura 70: Método do reservatório - Pormenor 5.

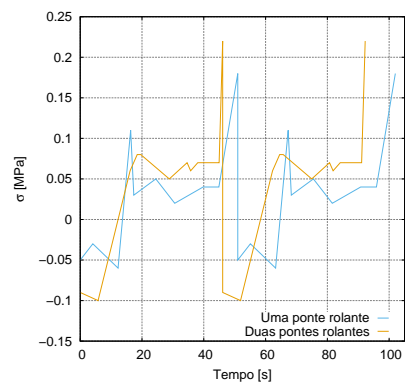


Figura 71: Método do reservatório - Pormenor 7.

### Apoio 3

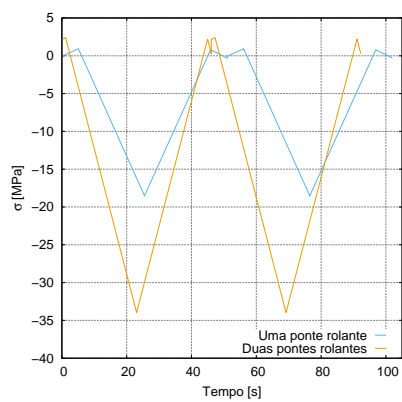


Figura 72: Método do reservatório - Pormenor 1.

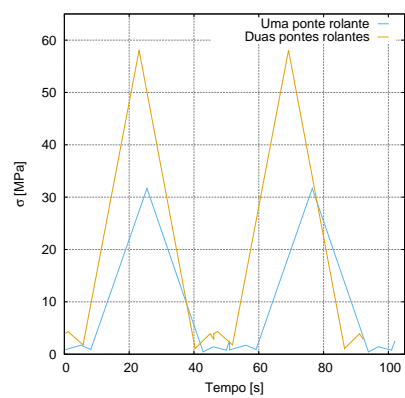


Figura 73: Método do reservatório - Pormenor 2.

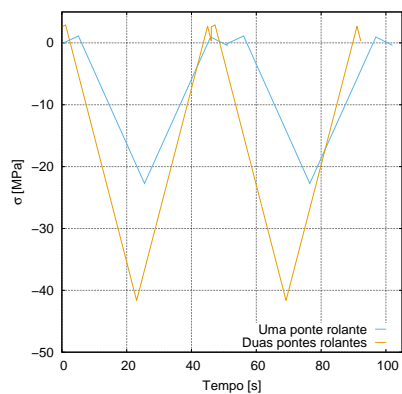


Figura 74: Método do reservatório - Pormenor 3.

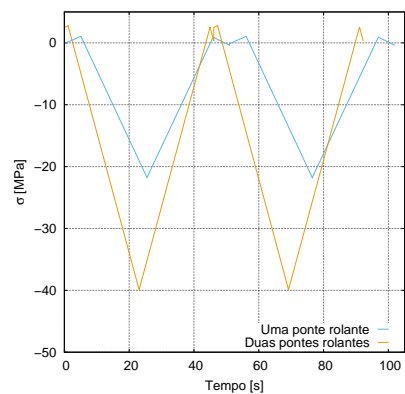


Figura 75: Método do reservatório - Pormenor 4.

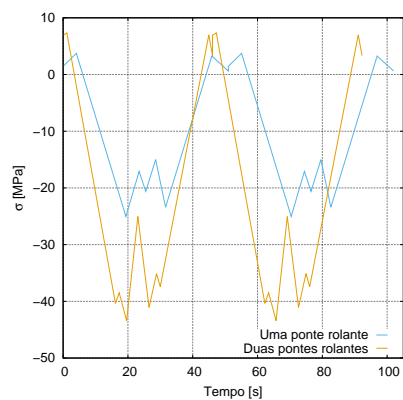


Figura 76: Método do reservatório - Pormenor 5.

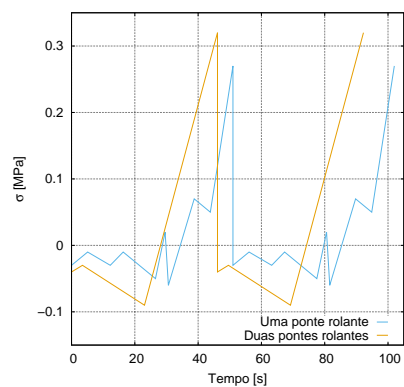


Figura 77: Método do reservatório - Pormenor 7.

#### Apoio 4

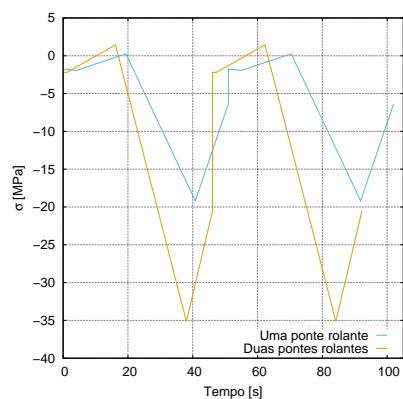


Figura 78: Método do reservatório - Pormenor 1.

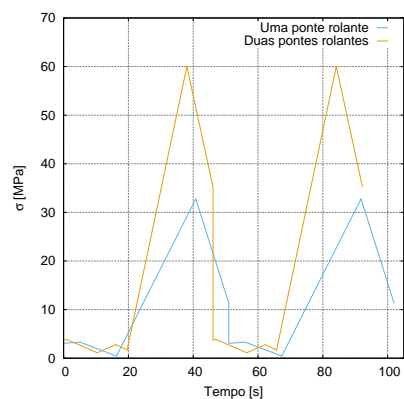


Figura 79: Método do reservatório - Pormenor 2.

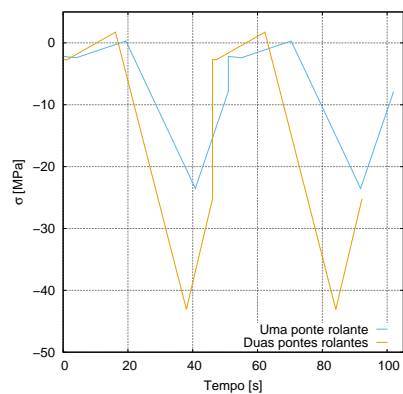


Figura 80: Método do reservatório - Pormenor 3.

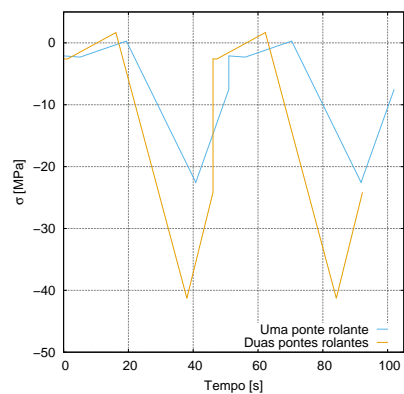


Figura 81: Método do reservatório - Pormenor 4.

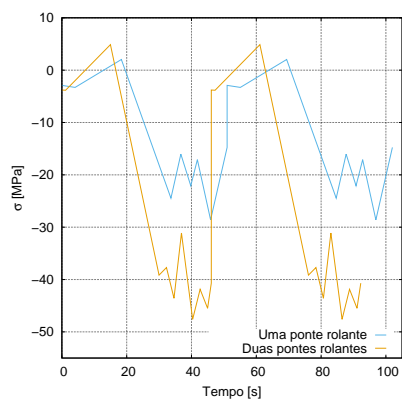


Figura 82: Método do reservatório - Pormenor 5.

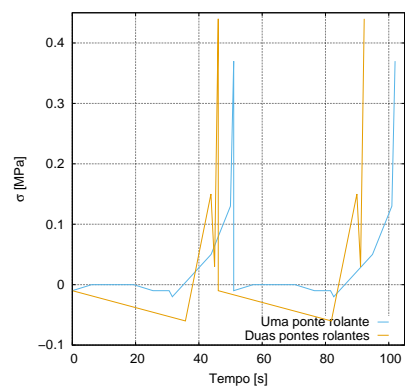


Figura 83: Método do reservatório - Pormenor 7.

## Apoio 5

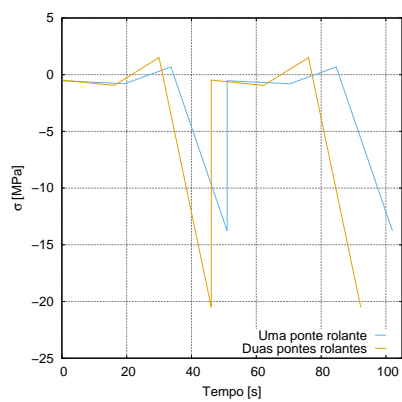


Figura 84: Método do reservatório - Pormenor 1.

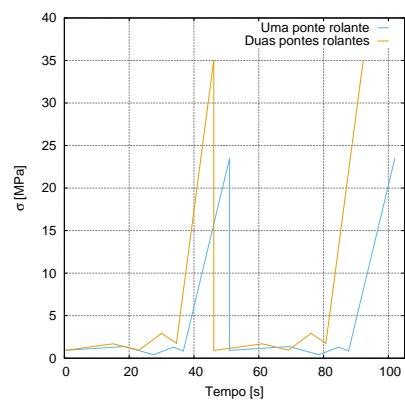


Figura 85: Método do reservatório - Pormenor 2.

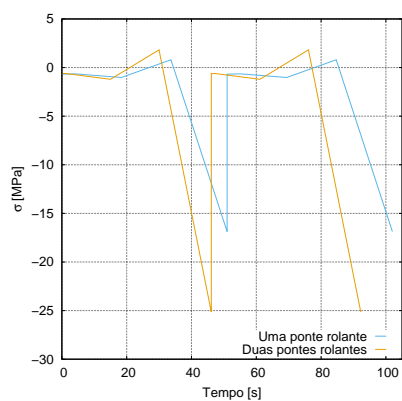


Figura 86: Método do reservatório - Pormenor 3.

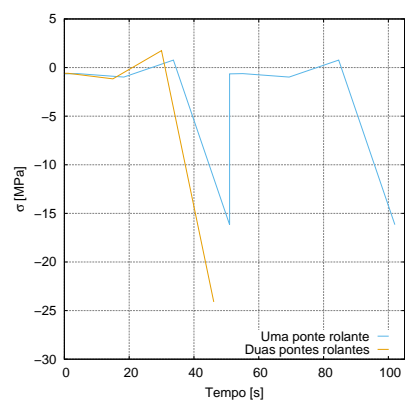


Figura 87: Método do reservatório - Pormenor 4.

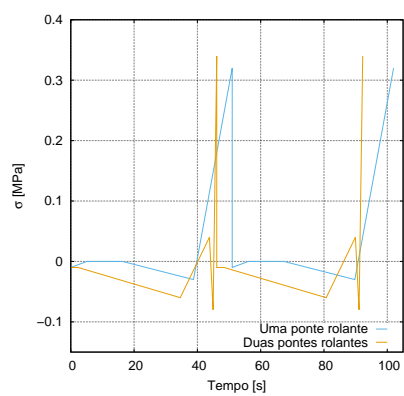


Figura 88: Método do reservatório - Pormenor 7.

